

НЕДЕЛЯ НАУКИ ФИЗМЕХ

Сборник аннотаций докладов
Всероссийской научной конференции

1 – 5 апреля 2024 года

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И МЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ»

М.В. Шахов, С.П. Рощупкин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РЕЗОНАНСНАЯ КИНЕМАТИКА РОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ ПАР И ЭЛЕКТРОНА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ С СИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ

Теоретически изучена резонансная кинематика процесса рождения электрон-позитронной пары и электрона при столкновении ультрарелятивистских электронов с сильной электромагнитной волной. Описание процесса основано на функциях Волкова, являющихся решением уравнения Дирака в поле плоской электромагнитной волны. Получена амплитуда процесса, выраженная в виде суммы парциальных амплитуд по числу испущенных и поглощенных фотонов волны. В условиях резонанса промежуточный фотон выходит на массовую оболочку. В результате этого исходный процесс второго порядка по постоянной тонкой структуры эффективно распадается на два процесса первого порядка: стимулированный внешним полем Комптон-эффект и стимулированный внешним полем процесс Брейта-Уиллера. Детально изучена резонансная кинематика процессов в первой и второй вершинах. Согласованность данных двух процессов имеет место в силу общего закона сохранения энергии. В силу этого, получены ограничения на углы вылета конечных частиц, число испущенных и поглощенных фотонов волны в первой и второй вершине. Показано, что углы вылета конечных частиц имеют однозначную связь, что качественно отличает резонансный процесс от нерезонансного процесса. При этом, энергия конечных частиц зависит от их углов вылета, а также от характерных квантовых параметров процесса. Данные параметры определяются отношением энергии начального электрона к характерным энергиям Комптон-эффекта и Брейта-Уиллера. Показано, что энергия начальных электронов может практически полностью переходить в энергию электрон-позитронной пары или конечного электрона.

А.А. Лобанов, Я.А. Бердников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУИНКЛЮЗИВНОГО ГЛУБОКОНЕУПРУГОГО РАССЕЙЯНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЭЛЕКТРОНА НА ПРОТОНЕ С РОЖДЕНИЕМ π^+ МЕЗОНА С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Спиновая структура протона представляет собой одну из актуальных проблем в современной физике. Для ее изучения необходим обширный объем экспериментальных данных и результатов теоретического анализа.

Представляются целесообразными поиски возможностей использования методов машинного обучения, включая нейронные сети, для всестороннего исследования вопросов, связанных и проблемой спина протона.

Ранее было показано, что на основе нейронных сетей возможно создание генераторов событий полуинклюзивного глубоконеупругого рассеяния неполяризованных заряженных лептонов (электронов и мюонов) на неполяризованных и поляризованных протонах.

В данной работе использована генеративно-состязательная сеть, на основе которой построен генератор событий полуинклюзивного глубоконеупругого рассеяния поляризованных электронов на неполяризованных протонах с рождением положительно заряженного пиона. Данный генератор способен предсказывать состояния конечного электрона и π^+ мезона при различных начальных энергиях в диапазоне $\sqrt{s_{eN}} = 20 - 100$ ГэВ.

Д.А. Трушков, Е.В. Банников, Д.О. Котов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ ПЛОСКОСТИ СОБЫТИЯ В СТОЛКНОВЕНИЯХ U+U ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ

Изучение рождения легких адронов в столкновениях U+U на коллайдере RHIC при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ дает основание предполагать вероятность возникновения сильновзаимодействующей ядерной материи, состоящей из асимптотически свободных партонов – кварк-глюонной плазмы. Основные свойства кварк-глюонной плазмы изучаются путем анализа различных наблюдаемых эффектов. Одним из таких наблюдаемых эффектов является эллиптический поток, который представляет из себя азимутальную анизотропию рождения частиц второго порядка в импульсном пространстве. Величина эллиптического потока отражает преобладающее направление движения частиц в поперечном пучку направлении. В случае нецентральных столкновений ядер направления оси пучка и вектора прицельного параметра определяют плоскость реакции. Таким образом, величина эллиптического потока напрямую связана с плоскостью реакции ядро-ядерных столкновений. Однако, поскольку плоскость реакции не может быть напрямую измерена в эксперименте, ее оценивают с помощью плоскости события. Степень различия реальной плоскости реакции и измеренной плоскости события определяется разрешением плоскости события. Разрешение оценивается с помощью корреляций плоскостей события, измеренных разными детекторами. Вследствие ограниченного акцептанта детекторных подсистем по азимутальному углу, плоскость события определяется не идеально, поэтому производится калибровка, необходимая для коррекции анизотропного распределения азимутального угла плоскости события.

В данной работе были определены и откалиброваны три плоскости события, по которым были рассчитаны значения разрешения. Полученные значения разрешений плоскости события будут необходимы в дальнейшем при измерении величины эллиптического потока адронов в столкновениях U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ.

Т.Д. Горелкина, П.С. Гуньков, С.С. Козловский, Я.А. Бердников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ЮВЕЛИРНОГО ИЗДЕЛИЯ

Метод рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) состава вещества активно используется во многих отраслях промышленности, науке, криминалистике, искусстве, археологии уже много лет. Для проведения точного количественного анализа состава исследуемого образца требуется большое количество стандартных образцов с известным составом. По процентному содержанию элементов в стандартных образцах строятся градуировочные зависимости, по которым определяется содержание элементов в

исследуемом образце. Также можно грубо оценить состав вещества с помощью метода фундаментальных параметров.

В этой работе была предпринята попытка произвести количественный анализ ювелирного изделия без использования довольно дорогостоящей методики стандартных образцов. С помощью измеренного спектра был получен качественный состав ювелирного изделия. Количественный состав ювелирного изделия был подобран с помощью программы для расчета прохождения излучения через вещество методом Монте-Карло. Для этого была построена расчетная модель экспериментальной установки, которая позволяла получать спектры флуоресценции адекватные наблюдаемым в эксперименте.

Затем подбиралось количественное содержание элементов в исследуемом образце, таким образом, чтобы наблюдаемые в расчетных спектрах пики флуоресценции совпадали по величине с экспериментальными.

И.И. Борисов, Е.В. Банников, Я.А. Бердников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВОПРОСЫ ПОДГОТОВКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА К ИЗМЕРЕНИЮ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ π^0 -МЕЗОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ U+U ПРИ ЭНЕРГИИ 193 ГэВ

При сверхвысоких значениях плотности энергии (~ 1 ГэВ/фм³) ядерная материя переходит в новое агрегатное состояние – кварк-глюонную плазму (КГП). КГП характеризуется деконфинированным состоянием кварков и глюонов, которые обычно находятся в связанном состоянии внутри адронов – в состоянии конфайнмента. Кварк-глюонная плазма может быть получена в столкновениях ультррелятивистских тяжелых ядер, в частности, в столкновениях ядер урана при энергии в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ, которые происходили на коллайдере RHIC. Свойства КГП изучаются с помощью различных наблюдаемых, одной из которых является эллиптический поток. Величина эллиптического потока характеризует неравномерность вылета частиц в поперечном пучку направлении, и, следовательно, она зависит от величины выходов частиц, в частности, π^0 -мезонов.

Для измерения выходов π^0 -мезонов используют электромагнитный калориметр, который позволяет регистрировать фотоны от распада π^0 -мезонов. Однако калориметр детектирует частицы не идеально: в процессе его работы могут случаться поломки конструктивных элементов, могут происходить скачки напряжения, сбои в работе электроники. Все эти факторы негативно влияют на результаты измерений. Неидеальная работа калориметра может существенно исказить получаемые значения эллиптических потоков. Для устранения негативных факторов производится калибровка калориметра – его настройка, позволяющая существенно улучшить качество проведенных измерений и отбраковать проблемные наборы данных.

В данной работе описан процесс калибровки электромагнитного калориметра в системе столкновений U+U при энергии 193 ГэВ, включающий тонкую калибровку энергии регистрируемых фотонов в каждом секторе и в каждом наборе данных.

Вычисленные в ходе работы энергетические коррекции регистрируемых фотонов позволяют в дальнейшем измерить эллиптические потоки π^0 -мезонов в столкновениях U+U при $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ без искажений.

И.И. Шевченко¹, И.Г. Голиков¹, А.А. Васильев², Ф.А. Пак², А.И. Халиков²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²«Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова» Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт»

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ОБЛУЧЕНИЯ НА УСКОРИТЕЛЕ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1000 МэВ, ПИЯФ

На ускорителе протонов СЦ-1000 в НИЦ "Курчатовский институт" – ПИЯФ проводятся исследования возможности использования протонов с энергией 1000 МэВ для лучевой терапии. При ротационном облучении удается достичь более высокого градиента дозы на границах облучаемого объекта, чем у модифицированного пика Брегга.

В данной работе проведено моделирование облучения фантома в различных режимах. Рассчитаны дозовые распределения для разного числа поворотов деки (n), при одинаковой дозе в изоцентре. Показано, как изменяется пространственное распределение дозы в зависимости от значения n . Полученные распределения позволяют выбрать оптимальный режим облучения.

С.Д. Комарова, Е.В. Банников, Д.О. Котов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ ПЛОСКОСТИ СОБЫТИЯ В СТОЛКНОВЕНИЯХ He+Au ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ

Столкновение ядер при высоких плотностях энергии дает возможность экспериментально обнаружить кварк-глюонную плазму (КГП) — адронную материю, состоящую из кварков и глюонов в состоянии деконфайнмента. Одним из методов изучения процессов образования КГП является измерение азимутальной анизотропии адронов, образующихся в ультрарелятивистских ядерных столкновениях. Определение эллиптического потока (v_2), описывающего азимутальное распределение частиц, позволяет выявить особенности рождения адронов относительно плоскости реакции, образованной осью пучка и прицельным параметром (b). Оси столкновения ядер не могут быть измерены непосредственно в эксперименте, вследствие чего азимутальный угол плоскости реакции оценивают с помощью измерения плоскостей события по азимутальным углам вылета частиц, зарегистрированных в детекторах. Разница между измеренными плоскостями события и истинными значениями плоскости реакции учитывается с помощью поправки — разрешения плоскости события, которое определяется в двух и более детекторных подсистемах. Ввиду ограниченного акцептанта и возможных дефектов детекторов, распределения измеренных плоскостей события анизотропны, в связи с чем производится их калибровка. В настоящей работе откалибровано распределение плоскостей события в трех детекторных подсистемах. Приведены результаты измерения разрешения плоскости события как функции от центральности, позволяющие впоследствии измерить значения v_2 в столкновениях He+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

С.М. Анцупов, Я.А. Бердников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНВАРИАНТНОГО P_T СПЕКТРА $K^*(892)$ МЕЗОНОВ В Au+Au СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГЭВ

Кварк-глюонная плазма (КГП) — экзотическое состояние вещества, в котором кварки и глюоны свободны от сильного притяжения, связующего их в адроны. Данное состояние материя достигает при очень большой плотности энергии, которая может быть получена при столкновении ультрарелятивистских тяжелых ядер. Одним из признаков образования КГП является увеличенный выход странных кварков. Данное явление можно наблюдать путем измерения факторов ядерной модификации для странных (содержащих странный кварк) частиц, одной из которых является $K^*(892)$ мезон. Для расчёта факторов ядерной модификации используется инвариантный p_T спектр — количественная оценка числа частиц, родившихся в результате столкновения.

В настоящей работе представлено описание методики оценки систематических неопределенностей инвариантного p_T спектра $K^*(892)$ мезона в сталкивающейся системе Au+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГЭВ в диапазоне поперечного импульса (от 0.9 до 6.5 ГЭВ/с) для разных классов событий по центральности (от 0 до 93%). Для обработанных данных с детектора PHENIX, был разработан алгоритм, позволяющий оценить систематические неопределенности переменных, необходимых для расчёта инвариантного p_T спектра, и результирующие систематические неопределенности инвариантного p_T спектра $K^*(892)$ мезона.

Е.В. Музьев, Я.А. Бердников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АСИММЕТРИЯ СИВЕРСА В ГЛУБОКО НЕУПРУГОМ РАССЕЙАНИИ МЮОНОВ НА ПОПЕРЕЧНО ПОЛЯРИЗОВАННОМ ПРОТОНЕ ПРИ ЭНЕРГИИ 160 ГЭВ

При изучении спиновых эффектов нуклонов особый интерес представляет исследование глубоко неупругого рассеяния (ГНР) лептонов на поляризованном протоне. Глубоко неупругое рассеяние — это процесс, при котором лептон взаимодействует с нуклоном, при этом переданный импульс и инвариантная масса значительно больше массы адрона (примерно 1 ГЭВ). Исследование процесса полуинклюзивного ГНР позволяет определить зависимость между спином нуклона и функциями распределения партонов в нуклоне. Одним из эффектов, возникающих в процессе полуинклюзивного ГНР на поперечно поляризованном протоне, является эффект Сиверса — зависимость поперечного импульса неполяризованного партона от поперечного спина нуклона. В результате этого эффекта возникает односпиновая азимутальная асимметрия образующихся в ГНР адронов, получившая название асимметрии Сиверса. В данной работе был проведен расчёт асимметрии Сиверса в полуинклюзивном глубоко неупругом рассеянии мюонов на поперечно поляризованном протоне при энергии 160 ГЭВ в зависимости от переменной Бьёркена в кинематике эксперимента COMPASS. Для этого был использован плагин StringsSpinner, учитывающий эффекты поляризации в PYTHIA8. Для расчета асимметрии Сиверса в программу были внесены изменения, связанные с партонными функциями распределения и синусными модуляциями. Было проведено сравнение с результатами эксперимента COMPASS.

А.Д. Селезнев, Д.О. Котов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНВАРИАНТНЫХ СПЕКТРОВ η -МЕЗОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ $He+Au$ ПРИ ЭНЕРГИИ 200 ГЭВ

По современным представлениям физики элементарных частиц, при больших плотностях энергии (≈ 1 ГэВ/фм³) вещество переходит в состояние, называемое кварк-глюонная плазма (КГП). Это состояние характеризуется явлением деконфайнмента, при котором кварки и глюоны практически не взаимодействуют друг с другом.

Физики считают, что вещество ранней Вселенной находилось в состоянии КГП. В лабораторных условиях образование КГП возможно на современных ускорителях тяжелых ионов, таких как Релятивистский Коллайдер Тяжелых Ионов в Брукхейвенской национальной лаборатории. Ускорители тяжелых ионов позволяют измерять наблюдаемые для изучения свойств КГП по косвенным признакам, например, по множественности образованных в ядроядерных столкновениях частиц. Характеристикой множественности частиц является инвариантный спектр по поперечному импульсу.

Инвариантные спектры по поперечному импульсу чувствительны к параметрам эксперимента и методам измерения, что приводит к возникновению систематических неопределенностей инвариантных спектров. В данной работе производится оценка систематических неопределенностей инвариантных спектров эта-мезонов в столкновениях $He+Au$ при энергии 200 ГэВ для разных классов событий по центральности.

Д.В. Кох, Я.А. Бердников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ МОДУЛЬ КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ РАДИАЦИОННОЙ РАЗВЕДКИ МЕСТНОСТИ

Исследование направлено на обоснование возможности создания облегченного фильтрационного модуля в составе комплекса для проведения воздушной радиационной разведки местности (ВРРМ).

Целью работы является создание фильтрационного модуля для комплекса ВРРМ, обладающего выгодными экономическими параметрами.

Актуальность проблемы исследования определяется высокими темпами развития атомной промышленности и сложившейся геополитической ситуаций.

В результате был создан фильтрационный модуль, обладающий низкой себестоимостью. Работоспособность модуля была подтверждена в ходе первичных лабораторных испытаний.

При проектировании модуля была применена концепция аэрозольного метода проведения ВРРМ, модифицированная для достижения минимальной себестоимости производства и эксплуатации. За основу был взят стандартная фильтрационная установка, предназначенная для применения на борту тяжелой пилотируемой авиации. В рамках модификации метода, тяжёлые конструктивные материалы, подлежащие деактивации, были заменены лёгкими полимерами, а размеры установки были уменьшены, для возможности установки модуля на борт БПЛА. Полимерные модули были сделаны легкосъёмными и заменяемыми для возможности их замены в случае избыточного загрязнения.

Образец модуля был произведён с применением аддитивных технологий. Был проведён лабораторный эксперимент, с целью подтвердить работоспособность устройства.

Фильтрационная система была помещена в радоновую камеру. Для имитации движения в составе комплекса, в камере был размещён вентилятор известной мощности, создающий воздушный поток. Модуль помещался в воздушный поток на равные промежутки времени с заменой фильтрующих участков. Результаты подтвердили работоспособность системы.

Д.С. Шапаев, Я.А. Бердников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РОЖДЕНИЕ ПРЯМЫХ ФОТОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕР ДЕЙТЕРИЯ ПРИ ЭНЕРГИЯХ 13,5 ГэВ И 27 ГэВ

Как известно, при высоких энергиях в результате столкновений частиц и ядер может рождаться значительное количество фотонов. По механизму образования фотонов выделяют распадные фотоны, которые возникают в результате радиоактивного распада промежуточных частиц, и нераспадные (прямые, фрагментационные, тормозные и др.). В данной работе рассматриваются прямые фотоны, появляющиеся в результате жесткого взаимодействия партонов. В связи с малой величиной константы электромагнитного взаимодействия прямые фотоны практически не взаимодействуют с окружающей ядерной средой. Это позволяет использовать прямые фотоны для исследования различных эффектов, в том числе и таких, как модификация функций партонного распределения во внутриядерных нуклонах за счет того, что эти нуклоны входят в состав ядра. В настоящей работе были получены факторы ядерной модификации прямых фотонов в столкновениях ядер дейтерия при энергиях, характерных для планирующихся экспериментов на коллайдере NICA: 13,5 и 27 ГэВ. Расчеты проводились как для ядерно модифицированных функций партонного распределения в нуклоне, так и для функций распределения партонов, рассчитанных для свободных нуклонов. Было показано, что влияние учета ядерно модифицированных функций партонного распределения слабо отражается на предсказаниях факторов ядерной модификации прямых фотонов в столкновениях ядер дейтерия.

А. Берналь, А.Д. Селезнев, Д.О. Котов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОДГОТОВКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА К ИЗМЕРЕНИЮ ИНВАРИАНТНЫХ СПЕКТРОВ РОЖДЕНИЯ η -МЕЗОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ $p+Au$ ПРИ ЭНЕРГИИ 200 ГэВ

Процесс сбора данных, полученных при столкновениях тяжелых ионов на коллайдере RHIC, занимает длительное время вплоть до нескольких месяцев. В течение этого времени могут возникать различные проблемы в работе детекторных подсистем эксперимента. Например, при работе электромагнитного калориметра могут наблюдаться скачки напряжения, поломки конструктивных элементов, сбои в работе считывающей электроники, а также колебания уровня шума. Эти события приводят к уменьшению чувствительности калориметра и, как следствие, к искажению измеряемых характеристик частиц.

Одно из проявлений неидеальной работы электромагнитного калориметра - образование в его секторах областей, уровень загрузки в которых значительно отличается от среднего по сектору, такие области называют *мертвыми башнями*. Искажение

энергетических параметров кластеров, расположенных в мертвых башнях, сильно влияет на сигналы от мезонов в распределениях инвариантной массы. Для повышения точности анализа исключаются кластеры, центры которых расположены в мертвых башнях. Эта процедура способствует сохранению целостности интерпретации данных и обеспечивает более надежную оценку характеристик частиц в условиях, вызванных локализованными проблемами детектора.

Целью настоящей работы является подготовка данных для измерения спектров η мезона, полученных при помощи электромагнитного калориметра в столкновениях $p+Au$ при энергии 200 ГэВ в эксперименте PHENIX в RHIC.

А.В. Халяпин¹, С.В. Бобашев², Д.П. Барсуков²

¹Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики,
Санкт-Петербург

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

СПЕКТРЫ ПОЗИТРОНОВ И ВЕРОЯТНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ ПАР ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГАММА-КВАНТОВ С КОРОТКИМ КОГЕРЕНТНЫМ РЕНТГЕНОВСКИМ ИМПУЛЬСОМ

В работе предлагается изучение спектров позитронов, которые образуются в результате взаимодействия гамма-квантов с когерентным коротким импульсом рентгеновского излучения, генерирующийся ультрарелятивистскими электронами. Поляризационные свойства гамма-кванта и позитронов не учитываются. Это явление может иметь место в плазме, которая находится в окрестностях пульсарных диодов радиопульсаров. Кроме того, такие импульсы, возможно, могут быть получены на источнике синхротронного излучения «СКИФ».

Найденный спектр образующихся позитронов имеет однопиковый профиль: при энергии фотонов $E=5 \cdot 10^{-3}$ МэВ рентгеновского импульса и при амплитуде импульса $eA/mc^2=10^{-3} \div 10^{-5}$ ширина пика равна примерно половине энергии гамма-кванта при $E'=50 \div 250$ МэВ, а для $E'=10$ ГэВ ширина близка к полной энергии гамма-кванта. Результаты данного исследования могут быть использованы для оценки качественных характеристик таких импульсов и развития методов их генерации.

Н.А. Шарипо, А.Д. Селезнев, Д.О. Котов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

КАЛИБРОВКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИНВАРИАНТНЫХ СПЕКТРОВ РОЖДЕНИЯ η -МЕЗОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ $p+Al$ ПРИ ЭНЕРГИИ 200 ГэВ

Один цикл ион-ионных столкновений на коллайдере может длиться до нескольких месяцев. За это время подсистемы детектора могут испытать множество технических неполадок, никак не связанных с физикой самого процесса столкновения: скачки рабочего напряжения, выход из строя башен сектора и т.д. Эти неполадки существенно влияют на характеристики подсистем детектора, искажая таким образом измеренные параметры рождённых в процессе столкновения частиц. В частности, эти неполадки искажают энергию регистрируемых частиц, с помощью которых в дальнейшем возможно получить инвариантные спектры рождения частиц в столкновениях. Изучение указанных спектров

позволяет нам исследовать эффект гашения струй – подавление выхода частиц, которое проявляется при образовании кварк-глюонной плазмы (КГП).

Для уменьшения влияния возникающих неполадок необходимо провести первичный отбор данных: исключить из анализа проблемные сегменты данных и башни секторов детектора. Помимо этого, необходимо провести тонкую калибровку детектора: привести восстановленную массу π^0 -мезона в разных сегментах данных к одному значению.

В данной работе приводится описание методов первичного отбора данных и тонкой калибровки детекторов с помощью восстановленной массы π^0 -мезона. Описанные методы затем могут быть применены для калибровки электромагнитного калориметра на эксперименте PHENIX с целью измерения инвариантных спектров рождения η -мезонов в столкновениях $p+Al$ на энергии 200 ГэВ.

А.Н. Романов¹, В.А. Бакаев¹, А.В. Мелентьев²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Санкт-Петербургский Городской клинический онкологический диспансер

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБЛУЧЕНИЯ В ДИСТАНЦИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

Актуальность. В дистанционной лучевой терапии тормозным излучением высокой энергии в настоящее время применяют методы облучения пациента: 3D-CRT, IMRT и VMAT. Эти процедуры выполняются с использованием современных линейных ускорителей электронов, оснащенных многолепестковыми коллиматорами. При трехмерной конформной лучевой терапии (3D-CRT) происходит точное составление плана лечения с использованием современных методов диагностики. Лучевая терапия с модуляцией интенсивности (IMRT) позволяет задавать интенсивность для каждого пучка излучения, повышая эффективность лечения. (VMAT) – ротационная терапия с модуляцией объёма излучения, которая обеспечивает точное распределение дозы облучения, рассчитанной и представленной в формате 3D.

Цель работы. Проведение сравнительного анализа перечисленных методик дистанционного облучения на двух разных медицинских линейных ускорителях электронов Varian Halcyon и Elekta Compact.

Материалы исследования. Основой исследования является применение физико-технических ресурсов Санкт-Петербургского городского клинического онкологического диспансера (ГКОД). В данной работе проводился анализ дозиметрических планов, полученных различными методиками.

Полученные результаты. Выполнено планирование облучения предстательной железы на основании методик IMRT, 3D-CRT и VMAT на линейных ускорителях электронов Varian Halcyon и Elekta Compact. Применение разных методик планирования позволило создать равномерное распределение дозы в облучаемом объеме, а в некоторых лечебных планах удалось уменьшить лучевую нагрузку на критические органы.

П.Р. Шаяхметова¹, А.М. Червяков¹, В.А. Бакаев²

¹Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологический) им. Н.П. Напалкова

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ДИСТАНЦИОННОЕ ОБЛУЧЕНИЕ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ МЕТОДОМ 3D-CRT НА МЕДИЦИНСКОМ УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ

Метод 3D конформной лучевой терапии (3D-CRT) – это один из основных способов дистанционной лучевой терапии фотонным излучением. В клинической практике данный метод проводится с применением медицинского ускорителя электронов, оснащенного многолепестковым коллиматором, с использованием тормозного излучения высокой энергии.

Цель настоящей работы – планирование облучения молочной железы методом 3D-CRT с использованием программы Eclipse и изучение особенностей работы с системой дозиметрического планирования дистанционной лучевой терапии на ускорителе Varian TrueBeam с максимальной энергией тормозного излучения 6 МэВ. В данном исследовании применялись физико-технические ресурсы ГБУЗ «Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологический) им. Н.П. Напалкова».

Полученные результаты. Рассчитаны лечебные дозиметрические планы дистанционного облучения молочной железы с использованием метода 3D-CRT в программе планирования облучения Eclipse. Для каждого исследуемого клинического случая проведена портальная дозиметрия в рамках программы гарантии качества для проверки физико-технических возможностей ускорителя воспроизвести рассчитанный план. В результате было выяснено, что все дозиметрические планы прошли проверку в рамках программы гарантии качества с критерием повышенной точности 3%/2мм. Для каждого варианта дозиметрического плана было рассчитано время проведения сеанса лучевой терапии. Показано, что на реализацию 3D-CRT планов требуется в среднем всего 0.4-0.45 мин.

М.В. Покидова^{1,2}, Я.А. Бердников^{1,2}, Ю.Г. Нарышкин¹

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОИСКИ РАСПАДА БОЗОНА ХИГГСА НА ЧАСТИЦЫ ТМ В ПРОЦЕССЕ ЕГО РОЖДЕНИЯ ПРИ СЛИЯНИИ ВЕКТОРНЫХ БОЗОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ АТЛАС

Поиски физики за пределами Стандартной Модели (СМ) являются одной из главных задач современной физики элементарных частиц. Существует ряд моделей, которые предсказывают распад бозона Хиггса СМ на гипотетические частицы Темной Материи (ТМ) - слабовзаимодействующие массивные частицы (WIMP). Такие модели, где Бозон Хиггса действует как частица-посредник между частицами ТМ и частицами СМ называются “порталом Хиггса” и лежат в основе исследований по поиску невидимого распада бозона Хиггса на частицы ТМ ($H \rightarrow inv$) в эксперименте ATLAS на Большом адронном коллайдере (БАК). Частицы ТМ не могут быть зарегистрированы детектором, их присутствие в распаде косвенно определяется наличием недостающей поперечной энергии E_{miss}^T в конечном состоянии.

В данной работе представлен обзор результатов, полученных для $H \rightarrow \text{inv}$ поиска в процессе рождения Бозона Хиггса при слиянии векторных бозонов (VBF+MET) за второй период работы БАК. Также представлена методика новых исследований $H \rightarrow \text{inv}$ поиска в VBF+MET канале и полученные автором, новые результаты для оптимизации критериев отбора сигнальных событий с помощью алгоритмов машинного обучения.

А.Ю. Арутюнова, Е.М. Маев
«Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова» Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт»

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ АКТИВНОЙ МИШЕНИ

Исследование комптоновского рассеяния на протонах и легких ядрах позволяет определить одну из фундаментальных характеристик нуклона — поляризуемость. Электрическая и магнитная поляризуемости будут определяться с помощью измерения зависимостей дифференциальных сечений комптоновского рассеяния от энергии и угла рассеяния фотонов. Разработанный в ПИЯФ метод исследования этого процесса, использующий активную мишень, является важной и интересной задачей. Активная мишень — это мишень, которая является одновременно газовой мишенью и детектором частиц отдачи. Она также имеет специальную сегментированную анодную плоскость, которая позволяет различать типы частиц. В ПИЯФ были проведены несколько исследований характеристик планируемого детектора — АСТАФ. Экспериментальные данные, полученные при тестовых экспериментах с прототипом АСТАФ, доказали возможность регистрации различных типов частиц отдачи с низкими энергиями (до 0.4 МэВ) и эффективностью, близкой к 100% при энергетическом разрешении 20-30 кэВ.

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НАНОСТРУКТУР»

В.А. Грабарь, М.Б. Лифшиц, Н.С. Аверкиев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЯДЕР AS В КРЕМНИИ В УСЛОВИЯХ ЭПР

Спины ядер в магнитном ядерном резонансе (ЯМР) и спины электронов в ЭПР представляют собой квантовые объекты позволяющие исследовать основные магнитные свойства вещества на микроскопическом уровне. Эффективность обоих этих методов может быть увеличена, если достигнута значительная поляризация спинов ядер. Термодинамическая поляризация спинов ядер во внешнем магнитном поле мала, и полезные сигналы в ЯМР оказываются слабыми. Однако в условиях ЭПР можно добиться значительной динамической поляризации ядерных спинов при увеличении интенсивности переходов с изменением проекции спина электрона, что довольно активно используется, например, в томографах. Одним из возможных вариантов усиления сигнала ЭПР - использование сильных магнитных полей и низких температур, когда заселенности электронных состояний с разной проекцией спина отличаются на несколько порядков. В этом случае степень ядерной поляризации может достигать 100% при относительно слабых накачках.

Различают два основных механизма динамической поляризации в условиях ЭПР: эффект Оверхаузера, который реализуется при возбуждении переходов с изменением проекции спина электрона и с сохранением проекции ядерного спина, и солид-эффект, который возникает при возбуждении флип-флоп переходов, когда сохраняется суммарная проекция спина электрона и ядра.

В докладе будет представлен метод решения задачи для обоих эффектов и приведено сравнение теоретически полученных кривых для сигналов ЭПР с экспериментальной картиной. Также будут представлены показательные для этих эффектов кривые.

К.А. Чудаков¹, Д.М. Бельтюкова², В.П. Белик², О.С. Васютинский²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе

ГЕНЕРАЦИЯ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРОМ РАДАХЛОРИН В PBS В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Одним из нехирургических методов лечения раковых заболеваний является фотодинамическая терапия, принцип действия которой состоит в следующем: в организм пациента вводится фотосенсибилизатор (ФС), большая часть которого накапливается в раковых клетках, затем облучается пораженная область лазером с длиной волны в полосе поглощения ФС, которое переводит молекулы ФС в возбужденное состояние. Эти молекулы ФС при столкновении с кислородом в основном триплетном состоянии переводят его в возбужденное синглетное состояние. Полученный таким образом, образовавшийся синглетный кислород (СК) инициирует гибель клетки. В нашей работе мы исследовали генерацию СК ФС Радахлорин (Радафарма, Россия) растворенного в буфере PBS в зависимости от температуры в диапазоне 4-40°C.

Установка представляла из себя кювету с раствором, помещенную в самодельный термостат на основе элемента Пельтье, которая располагалась вблизи входной щели

монохроматора. Концентрация раствор Радахлорина в PBS составляла 35 мкг/мл. Возбуждение ФС производилось импульсным лазером с длиной волны 405нм, длительностью импульса 100нс и частотой 100кГц. Регистрация производилась ИК ФЭУ Hamamatsu H10330B-45, подключенным к модулю времякорреляционной системы счета фотонов PicoHarp300 (TCSPC). Времяразрешенные кривые детектировались на длине волны 1276±2 нм. В результате было обнаружено, что при понижении температуры раствора относительно комнатной температуры происходит рост времени генерации и времени жизни СК, в то время как при нагреве явного изменения времен жизни не наблюдалось.

Е-К. С. Крутько¹, Д.В. Яшков¹, И.А. Горбунова², М.Э. Сасин², О.С. Васютинский²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИИ ВОЗБУЖДЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОФЕРМЕНТА NADPH В СВОБОДНОЙ ФОРМЕ И ПРИ СВЯЗЫВАНИИ С ФЕРМЕНТАМИ.

В области цитологической диагностики многие методы исследования клеток являются инвазивными и могут сильно влиять на их метаболизм или приводить к смерти. Поэтому в настоящее время актуальным является неинвазивный метод исследования живых клеток — метод время-разрешенной флуоресцентной спектроскопии. Анализ параметров флуоресценции коферментов NADH и NADPH, которые находятся в каждой клетке, позволяет оценить свойства микроокружения и может быть использован для диагностики клеточного метаболизма. NADH и NADPH в свободном состоянии спектрально идентичны, поэтому до сих пор актуальной задачей является их разделение.

В настоящей работе был проведен анализ параметров затухания поляризованной флуоресценции NADPH в свободном состоянии и в связанном с ферментами алкоголь-дегидрогеназой (ADH) и изоцитрат-дегидрогеназой (IDH). Двухфотонное возбуждение молекул осуществлялось фемтосекундными лазерными импульсами с длиной волны 730-840 нм. Было найдено различие во флуоресценции NADPH в связанном и свободном состояниях. Полученный результат может быть использован для разделения NADPH с другими ферментами в растворах и живых клетках.

Г.А. Куприянов, А.Н. Ипатов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПЛАЗМОННЫЙ РЕЗОНАНС В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛАХ СЕЛЕНИДА КАДМИЯ С РАЗЛИЧНЫМ ТИПОМ ЛЕГИРОВАНИЯ

В настоящее время одним из перспективных направлений развития науки и техники является квантовая плазмоника, которая изучает взаимодействие света с веществом на наноразмерном уровне. В связи с этим особое значение принимает необходимость создания и исследования новых материалов на основе наночастиц, чьи свойства существенно отличаются от таковых у классических объемных соединений. Так, для подобных частиц характерно наличие в их оптических спектрах дипольных плазмонных резонансов, чье положение зависит от ряда параметров, таких как геометрический размер самих частиц, число делокализованных носителей заряда и тип легирования, который можно определить как объемный или поверхностный.

Было проведено исследования влияния вышеперечисленных факторов на характер дипольных плазмонных мод на примере нанокристаллов селенида кадмия. Расчёты проводились на основе самосогласованного квантовомеханического описания возбуждённых состояний системы нелокализованных носителей заряда с использованием приближения Хартри-Фока, приближения локальных фаз с нелокальным и локальным обменным взаимодействиями, а также приближения локальной плотности.

В результате исследования было установлено, что у наночастиц как с поверхностным, так и с объёмным типом легирования имеется доминирующая резонансная мода коллективной природы. Её характер определяется всеми параметрами, влияние которых изучалось, и переходит из режима размерного квантования к классическим плазменным колебаниям в сферическом проводнике. При этом сам характер коллективного движения возбуждённых делокализованных носителей заряда определяется типом легирования.

Е.Д. Поленок¹, В.В. Чалдышев², Б.Р. Семягин³

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

³Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск

ПЛАЗМОННЫЙ РЕЗОНАНС УПОРЯДОЧЕННОЙ СИСТЕМЫ НАНОЧАСТИЦ ВИСМУТА В МАТРИЦЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

В настоящее время наноплазмоника привлекает огромный интерес исследователей по всему миру. Одна из причин этому – возможность преодолеть дифракционный предел, который ранее не позволял оптике быть применимой на нанометровом пространственном масштабе. Однако, локализованный плазмонный резонанс, эффективно взаимодействующий со свободными фотонами, может быть реализован в частицах, размеры которых составляют единицы нанометров. Таким образом, наноплазмоника способна давать нам информацию о процессах, происходящих на наномасштабах, используя чисто оптические методы.

В данном исследовании мы изучили спектры отражения образца, содержащего в себе 24 слоя наночастиц полуметалла висмута в матрице полупроводника арсенида галлия. Исследованный образец был выращен методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Экспериментально изучены спектры поглощения и отражения света с р- и s-поляризацией при различных углах падения света. В оптических спектрах обнаружены особенности, связанные с локализованным плазмонным резонансом в системе наночастиц. Проведено численное моделирование оптических свойств структур. Определены параметры модели, адекватно описывающей экспериментальные данные. Показана возможность одновременной реализации брэгговского и плазмонного резонансов в периодической системе наночастиц V_i в области окна прозрачности полупроводника GaAs.

РОСТ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ОБЪЕМЕ И НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА

В работе проведено исследование формирования серебряных наночастиц в объеме и на поверхности стекла, содержащего ионы серебра, при его термической обработке в восстановительной атмосфере. Ионы серебра предварительно вводились в стекло методом ионного обмена серебро – натрий. Наночастицы в ионообменном стекле образуются при восстановлении водородом ионов серебра до нейтрального состояния с последующим распадом твердого раствора и формированием металлических наночастиц за счет диффузии атомов серебра. Часть наночастиц образуется в подповерхностной области (объеме стекла), часть – на поверхности (наноостровковая серебряная пленка). Исследовано влияние режимов обработки стекла в восстановительной атмосфере – температуры и потока водорода – на формирование наночастиц.

Для диагностики наночастиц использовалась оптическая спектроскопия, поскольку металлические наночастицы демонстрируют выраженный плазмонный резонанс в видимой области, который приводит к появлению характерного плазмонного пика в спектрах оптического поглощения. Положение резонанса позволяет оценить размер наночастиц, а амплитуда пика – их объемные доли в объеме или на поверхности стекла. Для разделения вкладов объемных и поверхностных наночастиц спектры оптического поглощения снимались дважды: 1) от образца, содержащего как объемные, так и поверхностные наночастицы; 2) от образца, содержащего только объемные наночастицы после механического удаления наночастиц с поверхности. Исследование направлено на поиск режимов для преимущественного формирования наночастиц в объеме образца. Такие образцы могут применяться как подложки для гигантского комбинационного рассеяния с длительным сроком хранения.

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАРЯДА МАКСВЕЛЛА-ВАГНЕРА В ИОНООБМЕННЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ СТЕКОЛ

Натрий-калиевый ионный обмен традиционно используется для упрочнения натрий-силикатных стёкол и для получения в таких стеклах оптических волноводов за счёт увеличения показателя преломления. Для проведения ионного обмена образцы стекла на длительное время погружаются в расплав нитрата калия при повышенной температуре (350 °С и выше), в результате чего в стекле формируется градиентное распределение ионов калия у поверхности образца. Такие градиентные структуры способны накапливать заряд при приложении постоянного напряжения при комнатной температуре к нанесённым на них электродам и генерировать вторую оптическую гармонику лазерного излучения за счёт квадратичной оптической нелинейности, индуцированной в стекле высоким статическим электрическим полем этого заряда. Проведение ионного обмена через маску, расположенную на поверхности стекла, позволяет обеспечить латеральное ограничение области с градиентом концентрации калия и, потенциально, повысить эффективность генерации второй гармоники.

В настоящей работе методом конечных элементов построена двумерная модель диффузии ионов в стекле при натрий-калиевом обмене через маску с учетом отличия подвижностей входящих в состав стекла ионов Na^+ и инвазивных ионов K^+ и представлены временные зависимости двумерного распределения концентраций рассматриваемых ионов. Также рассчитана динамика формирования заряда и внутреннего электрического поля при приложении электрического напряжения к такой ионообменной структуре и рассмотрены особенности распределения электрического поля вблизи краёв используемого для подачи напряжения электрода и/или латеральных границ ионообменной области.

А.Н. Терпицкий¹, И.В. Решетов^{1,2}

¹Академический университет им. Ж.И. Алферова

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЗАГЛУБЛЕНИЕ ИОНООБМЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ СТЕКЛА ПРИ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

Ионный обмен традиционно используется для модификации приповерхностных областей щелочесодержащих стекол, в частности, для изготовления элементов интегральной оптики, таких как градиентные оптические волноводы. Протекающая при повышенной температуре замена содержащихся в стекле одновалентных ионов на ионы из расплавов солей, используемых при ионном обмене, существенно изменяет свойства ионообменной области. Одной из задач, возникающих при изготовлении интегрально-оптических структур, является смещение модифицированных областей от поверхности стекла (заглубление). Заглубление области с увеличенным за счет ионного обмена показателем преломления позволяет существенно снизить оптические потери, обусловленные рассеянием каналируемого светового излучения на поверхности стекла.

В настоящей работе продемонстрирована возможность заглубления областей стекла, модифицированных ионным обменом содержащегося в стекле натрия на калий и серебро из расплавов нитратов, с помощью термической поляризации стекла в тлеющем разряде. Разряд, возникающий при приложении постоянного электрического напряжения к анодному электроду, отстоящему на 200 мкм от поверхности разогретой стеклянной пластины (катодный электрод прилегает к другой стороне этой пластины), приводил к образованию ионов гидрония в области разряда. Эти ионы проникали в стекло и под действием напряжения дрейфовали в направлении катода. При этом ионы, введенные в стекло при ионном обмене, смещались вглубь стекла, т.е. ионообменная область заглублялась. Параметры ионного обмена и термической поляризации варьировались в процессе экспериментов. Для анализа профилей концентрации полученных образцов применялся метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

И.О. Райков, Я.М. Бельтюков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ПЛОТНОСТИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ БОЛЬШИХ АМОРФНЫХ СИСТЕМ

В аморфных системах часто наблюдается явление, которое называется "бозонным пиком". Оно проявляется в превышении низкочастотной плотности состояний над

дебаевским вкладом $\sim \omega^{(d-1)}$. Данное превышение указывает на наличие нефоновых вкладов, таких как квазилокальные колебания. Для определения такого превышения требуется точный расчёт плотности состояний для малых частот. Плотность состояний может быть эффективно рассчитана с использованием метода полиномиальных ядер (Kernel Polynomial Method, КРМ). Такой метод не требует полной диагонализации матрицы и использует только операции умножения матрицы на вектор. При этом выбор семейства полиномов влияет на поведение аппроксимированной плотности на границе спектра и оптимальный выбор зависит от низкочастотной плотности колебательных состояний. Однако, для подавления осцилляций Гиббса в процессе аппроксимации необходимо также использовать коэффициенты затухания. Свойства этих коэффициентов зависят от выбранного семейства полиномов и также влияют на спектральное разрешение метода. В данной работе КРМ был обобщен на двухпараметрическое семейство полиномов Якоби $P_n^{(\alpha, \beta)}$, где параметры α и β определяют поведение на краях спектра. Для произвольных допустимых значений α и β были получены коэффициенты затухания, которые обеспечивают оптимальное спектральное разрешение при условии сохранения положительности спектра. Такое обобщение позволяет более гибко настраивать метод КРМ для задач, где требуется анализ спектральных свойств аморфных систем.

Авторы благодарят РФФ за финансовую поддержку (грант № 22-72-10083).

Н.С. Урсуленко¹, А.В. Редьков²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Институт Проблем Машиноведения РАН

ОПТИМИЗАЦИЯ РОСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛОВ И ТОНКИХ ПЛЁНОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В последние десятилетия развитие высокотехнологичных отраслей во многом зависит от качества и свойств кристаллов и тонких пленок, используемых в производстве различных устройств. В частности, современные полупроводниковые приборы требуют высокочистых материалов с точно контролируемыми характеристиками. Оптимизация процессов роста этих материалов имеет решающее значение для повышения их эффективности и снижения затрат на производство.

В настоящей работе реализуется новый генеративный подход для описания процесса роста кристаллов и тонких пленок. Подход основан на проведении десятков тысяч численных экспериментов с использованием метода Монте-Карло при различных ростовых условиях, а также на вычислении параметров растущего кристалла для каждого эксперимента. Полученная синтетическая база данных подвергается обобщению с помощью различных алгоритмов машинного обучения. Аналитические выражения зависимости скорости роста от основных параметров могут быть найдены с применением символьной регрессии, как одного из алгоритмов машинного обучения.

Цель работы заключается в использовании символьной регрессии для поиска подобных зависимостей и нахождения аналитических выражений, описывающих зависимость конечных свойств процесса роста, таких как скорость роста и шероховатость поверхности, от условий синтеза и других параметров системы.

В результате работы была разработана библиотека, описывающая рост кристаллов в различных режимах и связывающая микроскопические и макроскопические процессы. Также были получены 3D аналитические выражения с использованием символьной регрессии. Это позволяет описывать зависимости между свойствами процесса роста и условиями синтеза.

СТРУКТУРНЫЕ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАГНЕТРОННЫХ НАНОПЛЕНОК TaN С РАЗНОЙ ТОЛЩИНОЙ

Магнетронные нанопленки TaN, имеющие высокие показатели термостойкости, химической инертности и низкого электрического сопротивления, активно используются в микроэлектронной промышленности в качестве диффузионных барьеров и усилителей адгезии, а также в качестве износостойких и оптических покрытий. Использование нитридов тугоплавких металлов является одним из перспективных направлений исследований в области создания мемристивных структур. Таким образом, актуальной задачей является формирование и исследование нитридов тугоплавких металлов на предмет их использования в мемристорах. В данной работе представлен метод формирования тонких пленок из TaN методом магнетронного напыления.

Изменяя параметры процесса магнетронного напыления, были получены образцы тонких пленок из TaN на поверхности кремниевой подложки. По результатам элементного, рентгенофазового анализа и морфологических изменений поверхности по изображениям, полученным с помощью атомно-силового микроскопа, а также полученной на этой основе фрактальной размерности было установлено, что при времени напыления 300с из-за доминирующего действия механизма роста Вольмера-Вебера, нарушается их сплошность, а структура принимает строго столбчатый вид.

Е.Ю. Орлов, А.П. Кузьменко
Юго-Западный государственный университет

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ И РЕШЕТОЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ НАНОКОМПОЗИТОВ «hBN/ГРАФЕН» МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ

Исследовалась зонная структура композита «графен/hBN/графен». Варьировалось количество слоев нитрида бора, заключенных между монослоями графена. Структуры моделировались в гексагональной сингонии. В качестве пути обхода по обратной решетке использованы точки Г-К-М-Г первой зоны Бриллюэна. Энергия обрезания плоских волн составляла 50 Ry. Полученные диаграммы зонной структуры находятся в согласии с опубликованными результатами. При увеличении количества слоев hBN обнаружено появление и увеличение прямой запрещенной зоны, а также характерной уширение некоторых линий в зоне проводимости. Нами был проведен расчет частот фононов около Г-точки зоны Бриллюэна. Энергия обрезания плоских волн составляла 50 Ry. Фононные моды были рассчитаны в трех пространственных направлениях.

Полученные частоты находятся в хорошем согласии с литературными данными для графена и нитрида бора. Обнаруженный характерный сдвиг частот акустических фононов в структуре «графен/hBN/графен» в сравнении с изолированными монослоями связан с вандер-ваальсовым взаимодействием между слоями графена и нитрида бора. При этом частоты оптических фононов оказались практически независимыми в данной структуре, что так же указывает на низкую энергию взаимодействия между монослоями.

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И КОСМОСА»

Ф.В. Белоус, А.М. Пономаренко, А.Ю. Токарев, А.Ю. Яшин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

В докладе представлены результаты работы над системой автоматической диагностики плазмы в сферических токамаках с использованием элементов машинного обучения и классических алгоритмов, таких как быстрое преобразование Фурье (Fast Fourier Transform, FFT) и фильтр Баттерворта.

Основной режим работы токамаков в настоящее время – режим улучшенного удержания или H-мода, характеризуется большими значениями градиента давления плазмы на периферии, что является причиной возникновения различных неустойчивостей, в частности, срыва из потока плазмы множественных филаментов. Такие явления приводят к импульсным выбросам частиц и энергии из области удержания на первую стенку и пластины дивертора, что может привести к повреждению установки. В связи с этим изучение возникновения и развития филаментов является важной и актуальной задачей в настоящее время, которой занимаются, в том числе, на сферическом токамаке Глобус-М2.

С помощью алгоритмов FFT и фильтра Баттерворта была разработана система выявления аномальных участков в сигнале микроволновой диагностики плазмы. Используя нейросетевые фильтры для классификации аномалий, система в автоматическом режиме определяет качество филамента и его временные границы. В данной работе приведено сравнение работы нейросетей с различными архитектурами и проведено исследование процесса принятия решения нейросетью, что имеет большое значение для дальнейших работ по автоматизированной системе диагностики и контроля плазмы в токамаках.

Настоящая работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту № FSEG-2024-0005.

М.Н. Голубев¹, П.А. Кислицын², А.В. Иванчик²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

СВЕРХТОНКОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ УРОВНЕЙ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ КАК ВОЗМОЖНЫЙ ИСТОЧНИК СПЕКТРАЛЬНОГО ИСКАЖЕНИЯ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В скором будущем ожидается измерение влияния сверхтонкого перехода основного энергетического уровня атома водорода (широко известной линии 21 см) на спектр реликтового излучения, что позволит измерить температуру Вселенной в эпоху Темных Веков, в свою очередь это позволит определить наличие экзотических источников нагрева в ранней Вселенной, например, первичных черных дыр, и уточнит время образования первых звезд и галактик. В связи с этим встает вопрос, какие элементы могут вносить подобные искажения и насколько сильно. В работе представлен систематический анализ способности других атомов и молекул искажать спектр реликтового излучения. В качестве потенциальных кандидатов было исследовано 5 атомов, 2 молекулы, наиболее распространенные в первичной среде, и их ионы. Наибольшее влияние должен оказывать

сверхтонкий переход в дейтерии, однако, по сравнению с водородом эффект будет на 7 порядков слабее.

М.В. Дерябина¹, С.В. Шаталин², С.И. Лашкул², Л.А. Есипов², А.Б.Алтухов²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

ЗОНДОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ГАЗОНАПУСКОМ В РАСКРЫВЕ НИЖНЕГИБРИДНОЙ АНТЕННЫ-ГРИЛЛА ТОКАМАКА ФТ-2

Эффективность взаимодействия электромагнитной волны нижегибридного диапазона частот с плазмой токамака существенно зависит от параметров периферийной плазмы. В частности, результаты моделирования свидетельствуют о возможности значительного уменьшения коэффициентов отражения и направленности при уменьшении градиента концентрации заряженных частиц периферийной плазмы в области расположения излучающей антенны. При снижении градиента концентрации происходит, также, изменение спектра продольных замедлений инжектируемой волны, что повышает эффективность генерации безындукционного тока в плазме токамака.

Уменьшения градиента плотности заряженных частиц можно достичь, применив дополнительный напуск нейтрального рабочего газа с помощью импульсного клапана непосредственно вблизи антенны. В экспериментах на токамаке ФТ-2 установлено, что в этом случае значительно снижается негативное влияние периферийной параметрической неустойчивости на эффективность поглощения нижегибридной волны плазмой.

Параметры периферийной плазмы измерены с помощью подвижных многоэлектродных электростатических зондов, позволяющих получать данные о плотности и температуре электронов, потенциале плазмы, а также о флуктуациях этих величин. Установлена зависимость периферийных параметров от расстояния от места газонапуска (тороидальная неоднородность). Подтверждено существенное уменьшение радиального градиента плотности плазмы при напуске газа непосредственно в область измерения. Обнаружен эффект «вытеснения» плазмы под действием электромагнитной волны.

В.А. Елатонцев, С.П. Рощупкин, В.В. Дубов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РЕЗОНАНСНАЯ КИНЕМАТИКА РОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЙ ПАРЫ И ГАММА-КВАНТА, ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ГАММА- КВАНТОВ С СИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ

Теоретически изучена резонансная кинематика рождения ультрарелятивистской электрон-позитронной пары и гамма-кванта, при столкновении гамма-квантов высокой энергии с сильной электромагнитной волной. В условиях резонанса промежуточный электрон (для канала А) или позитрон (для канала В) в поле волны выходят на массовую оболочку. В результате этого исходный процесс второго порядка по постоянной тонкой структуры эффективно распадается на два процесса первого порядка: стимулированный внешним полем процесс Брейта-Уиллера и стимулированный внешним полем эффект Комптона. Детально изучена резонансная кинематика процесса в условиях, когда энергия начальных гамма-квантов значительно превышает энергию покоя электрона. В этом случае все конечные частицы (электрон-позитронная пара и гамма-квант) рождаются в узком конусе

вдоль направления импульса начального гамма-кванта. При этом направление распространения электромагнитной волны лежит вдали от данного узкого конуса частиц. Для каждого из данных процессов (в первой и второй вершинах) выполняются законы сохранения энергии-импульса. При этом, энергии электрон-позитронной пары и гамма-кванта зависят от их углов вылета и характерных квантовых параметров, которые определяются отношением энергии начального гамма-кванта к характерной энергии стимулированного внешним полем процесса (Брейта-Уиллера и Комптон-эффекта). В отличие от нерезонансного процесса, в условиях резонанса углы вылета электрон-позитронной пары и гамма-кванта однозначно связаны между собой. Показано, что энергия начального гамма-кванта может практически полностью переходить в энергию электрон-позитронной пары или конечного гамма-кванта.

Краяни Хуссейн Али¹, В.А. Кобозева²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

² Санкт-Петербургский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖЗВЕЗДНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ И ПОЛЯРИЗАЦИИ В ОКРЕСТНОСТИ ГЛОБУЛЫ CB54

В работе подробно изучается явление межзвездного поглощения и поляризации света в направлении глобулы CB54. Авторы выполнили BVR-фотометрию, наблюдая сотни звезд в окрестности глобулы, и дополнили полученные данные параллаксами из каталога Gaia DR3, а также данными других фотометрических и поляриметрических исследований. Классификация звезд и оценка поглощения определялись с помощью критерия χ^2 . Такой подход позволил выявить зависимости между межзвездным поглощением и поляризацией, что в свою очередь дало возможность получить новую информацию о свойствах пыли и ее распределении в диффузной межзвездной среде, а также об ориентации магнитных полей в изучаемой области. В результате уточнены расстояния до трех предполагаемых поглощающих слоев пыли в направлении глобулы, определены значения видимого поглощения в них и изучено отношение степени поляризации к поглощению. Результаты исследования способствуют более глубокому пониманию процессов, происходящих в межзвездном пространстве, и могут быть использованы для дальнейших астрофизических наблюдений и моделирования.

К.А. Кукушкин, В.А. Рожанский, Е.Г. Кавеева, К.В. Долгова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СОГЛАСОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКАМАКА ГЛОБУС-M2: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе представлены результаты моделирования пристеночной плазмы токамака Глобус-M2 кодом SOLPS-ITER с согласованным использованием гидродинамического кода B2.5 и кода Монте-Карло для нейтральных частиц EIRENE. Моделирование такого рода было проведено для токамака Глобус-M2 впервые, до этого все расчеты производились только с использованием гидродинамического кода. В рамках подготовки расчета используемая в коде геометрия установки Глобус-M2 была обновлена по последним данным о параметрах вакуумной камеры токамака, уточнены места и мощности систем напуска и откачки рабочего газа. Данные о магнитном равновесии были получены с помощью кода ruGSS по экспериментальным данным выбранного для моделирования

разряда. В ходе расчета проводилась корректировка по данным Томсоновской диагностики и диверторных зондов, собранным в моделируемом разряде. В ходе проведения расчета был выявлен ряд численных неустойчивостей, специфичных для согласованного моделирования. В докладе приведено описание методов, использованных для подавления данных неустойчивостей.

Ю.С. Лашкина, В.Ю. Сергеев, А.Н. Кривошеев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕНОСА ЧАСТИЦ ПРИ СОЗДАНИИ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПЛАЗМЕ ГЕЛИОТРОНЕ LHD

При инъекции макрочастиц на периферии плазмы установок с магнитным удержанием создается положительное возмущение плотности электронов за счет испаренного вещества и отрицательное возмущение температуры электронов за счет внесения холодных испаренных частиц и их излучения. Понятие «нелокального» переноса тепла при создании таких возмущений вводят для экспериментально наблюдаемого нагрева центральных областей плазмы при охлаждении периферии. Данное явление активно исследуется на различных установках с целью определения физических механизмов, требуемых для его интерпретации. Обсуждаются два отличающихся подхода: 1) подбор эволюции коэффициента температуропроводности плазмы в предположении, что она неподвижна; 2) подбор эволюции движения плазмы в предположении неизменности коэффициента температуропроводности.

В данном докладе представлены результаты анализа возмущений как тепла, так и плотности электронов после инъекции полистироловой макрочастицы в гелиотроне LHD. Показано, что эволюция возмущений плотности носит диффузионный характер даже в случае «нелокального» переноса импульса температуры электронов. Это свидетельствует в пользу упомянутого выше второго подхода для объяснения наблюдаемых в эксперименте эволюций возмущений плотности и температуры электронов.

А.А. Матевосян¹, Д.П. Барсуков²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

ВЛИЯНИЕ ИСКРИВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА НА МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПУЛЬСАРА

Рассматривается влияние искривления пространства в метрике Шварцшильда на вклад внешнего магнитного поля нейтронной звезды в момент инерции пульсара. Рассмотрены два случая: осесимметричного и неосесимметричного мелкошасштабного магнитного поля звезды. Рассмотрена зависимость вклада от двух параметров: от массы нейтронной звезды при фиксировании параметра мультиполярности и от параметра мультиполярности при фиксировании массы. Показано, что «увеличение» мелкошасштабного поля по сравнению с полем пространства плоской метрики не оказывает сильного влияния в момент инерции по сравнению со случаем плоского поля. Область данного «увеличения» напряженности мелкошасштабного магнитного поля мала по размерам. Продемонстрировано, что вклад искривления пространства понижает влияние магнитного поля звезды вне радиопулсара в изменение тензора инерции от сферического случая при фиксированном значении магнитного поля на поверхности звезды.

Д.Б. Матросова¹, Ю.А. Кропотина²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЗЕМЛИ В ПЕРИОДЫ СЛАБОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Изучение структуры бесстолкновительных ударных волн и формирующих их неустойчивостей важно для понимания структуры ударных волн в удаленных астрофизических объектах, где недоступны прямые наблюдения. Многие астрофизические ударные волны возникают в слабо замагниченной среде. Понимание их природы необходимо, например, при интерпретации наблюдений рентгеновского излучения скоплений галактик. Головная ударная волна Земли является наиболее изученной бесстолкновительной ударной волной благодаря доступности прямых наблюдений, поэтому важно исследовать её характеристики при различных условиях. Периоды слабой замагниченности головной ударной волны достаточно редки, тем не менее уже существуют наблюдения нескольких десятков таких событий. Измеряемая структура ударной волны в этом случае оказывается достаточно сложной, с сильными вариациями магнитного поля и плотности.

В данной работе исследована природа сильных колебаний магнитного поля вблизи фронта головной ударной волны Земли в областях со слабым (менее 10 нТ) межпланетным магнитным полем. Определены типы неустойчивостей, определяющие структуру фронта. Показано, что в подножии ударной волны могут раскачиваться одновременно ионная вейбелевская и альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость. Исследованы дисперсионные характеристики, поляризация и скорость волн вблизи фронта.

Е.С. Мелихова¹, А.К. Павлов², Г.И. Васильев²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

ОГРАНИЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ О КОСМОГЕННОМ РАДИОУГЛЕРОДЕ В ЛУННОМ РЕГОЛИТЕ

В радиоуглеродном ряду были обнаружены события с аномально высоким содержанием ^{14}C и быстрым его нарастанием (порядка года – нескольких лет). В большинстве работ предполагается, что такие события могут быть вызваны супервспышкой на Солнце (или серией мощных вспышек). В супервспышках при резком возрастании потока СКЛ увеличивается скорость образования ^{14}C в лунном грунте. С учётом его распада это отражается на глубинном распределении измеряемой активности. В кернах лунного грунта, доставленного Аполлоном-15, были проведены детальные измерения глубинного профиля активности ^{14}C . В данной работе мы рассматриваем, согласуются ли эти измерения с моделированием вклада ГКЛ и СКЛ в глубинный профиль активности ^{14}C . Вклад ГКЛ был нами рассчитан с помощью GEANT4, учитывались вариации потока ГКЛ в результате солнечной модуляции. Мы использовали зависимость модуляционного потенциала $\phi(t)$, восстановленную за последние 19000 лет по космогенным изотопам на Земле с локальным межзвездным спектром ГКЛ. После вычитания вклада ГКЛ мы рассчитали вклад усреднённого потока СКЛ со спектром частиц $E^{-\gamma}$ для различных значений γ . Было получено, что для описания глубинного профиля скорости образования ^{14}C в верхнем слое лунного грунта за последние 20000 лет требуется, чтобы $\gamma \approx 6$. Интерпретация обнаруженных по измерениям ^{14}C на Земле суперсобытий как солнечных супермощных вспышек с «жестким»

спектром противоречит измеренному ходу глубинного профиля активности ^{14}C в лунных ядрах.

В.Д. Петренко¹, В.В. Солоха^{1,2}, коллектив токамака Глобус-М2
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ НА СТАБИЛИЗАЦИЮ ПИЛИНГ-БАЛЛОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

В разряде № 41105 на токамаке Глобус-М2 было замечено, что при увеличении эффективного заряда срывы краевых неустойчивостей, десинхронизованных с пилообразными колебаниями, отсутствуют. Повышение устойчивости краевой плазмы наблюдается при неизменных профилях концентрации и температуры электронов. Было предложено объяснение, связанное с увеличением плотности бутстреп тока при возрастании эффективного заряда.

Краевые неустойчивости — вид магнитогидродинамических неустойчивостей, описываемых с помощью пилинг-баллонной (ПБ) модели. Она связывает дестабилизацию мод с увеличением градиента давления и плотности тока в пьедестале.

Было проверено предположение о стабилизации пилинг-баллонной моды, вследствие повышения плотности бутстреп тока. Инкремент неустойчивости был рассчитан с помощью кода VOUT++.

Расчёты показали, что при увеличении эффективного заряда (Z_{eff}) наблюдается снижение инкремента γ в области полного давления от $p_{\text{ped}}=0.5$ кПа до $p_{\text{ped}}=6$ кПа и ширины пьедестала от $\Delta p_{\text{ped}}=2\%$ до $\Delta p_{\text{ped}}=8\%$ в нормированных потоковых координатах. При низком эффективном заряде ($Z_{\text{eff}}=1.1$) наблюдается дестабилизация ПБ неустойчивости, инкремент равен $\gamma \approx 0.15$ $1/\tau_A$, где τ_A - альфвеновское время. Для случаев со средним ($Z_{\text{eff}}=2.3$) и высоким ($Z_{\text{eff}}=3.5$) эффективными зарядами инкремент снижается более чем в 2 раза относительно случая с более низким эффективным зарядом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №23-72-00024. Эксперименты проведены на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях".

А.А. Попова¹, И.Д. Караченцев²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Специальная астрофизическая обсерватория РАН

СРЕДНИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В МЕСТНОМ ОБЪЕМЕ ВСЕЛЕННОЙ

Изучение эволюции галактик является одной из важнейших задач в рамках расширения представлений астрофизики о крупномасштабной структуре Вселенной и её изменении со временем. Особый интерес представляет собой эволюция галактик в Местном объеме (красное смещение $Z \leq 0.001$), так как она позволяет получить информацию о «настоящем» в эволюции галактик и тем самым определить финальное состояние, к которому должны приводить те или иные модели эволюции галактик.

В данной работе по данным о наблюдаемых потоках 1400 галактик в Местном объеме в дальнем ультрафиолете (FUV) и в линии Н-альфа определен средний темп звездообразования SFR в единичном объеме Вселенной: $(1.39 \pm 0.16) \cdot 10^{-2} \frac{M_{\text{Sun}}}{\text{yr} \cdot \text{Mpc}^3}$. Показано, что при современном темпе звездообразования за космологическое время 13.8

млрд. лет во Вселенной воспроизводится около ($65 \pm 4\%$) наблюдаемой звездной массы. При этом запасы нейтрального газа в Местном объеме радиусом 12 Мпк позволяют поддерживать современный темп SFR на шкале еще около 2 млрд. лет.

М.Е. Ренев, Ю.В. Добров, В.А. Лашков, И.Ч. Машек, Р.С. Хоронжук
Санкт-Петербургский государственный университет

ВЛИЯНИЕ БЕЗЫСКРОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ИНИЦИАЦИИ НА НАДЕЖНОСТЬ И ПОРОГ ЗАЖИГАНИЯ СВЧ РАЗРЯДА

Актуальна разработка плазменных методов энерговложения в среду для задач снижения сопротивления сверхзвукового обтекания. Необходимо, чтобы методы работали надежно: плазма с заданными параметрами (момент зажигания, размер, положение и т.д.) воспроизводилась и не имела пропуски зажигания. А затраты энергии при этом были по возможности снижены.

В данной работе экспериментально исследуется надежность и порог зажигания СВЧ-разряда с лазерной инициацией. Отсутствие пропусков зажигания СВЧ-разряда без инициации зависит от естественного фона затравочных электронов. Фокусирующие СВЧ-антенны имеют дополнительные области фокусировки электрического поля, кроме главной. Из-за этого невысока точность попадания плазмы в заданное место. Возможно появление дополнительных разрядов – потребителей энергии.

Использовалась вакуумная камера, среда воздух 40-90 Торр. СВЧ излучение: генератор с магнетроном МИ-505 (частота 10 ГГц, мощность 200 кВт), эллиптическая антенна. Лазерное излучение: лазер EverGreen 200 (532 нм, 200 мДж энергия импульса, длительность 10 нс), фокусная линза 250 мм, световые потоки лазера до $9 \cdot 10^{12}$ Вт/см² в фокусе (лазерная искра не возникала). Главный фокус СВЧ излучения и фокус лазерного луча сведены вместе. Луч проходил параллельно вектору электрической напряженности СВЧ поля.

Синхронно инициированный СВЧ-разряд зажигался быстрее в 2 раза без смещений от луча лазера, без дополнительных разрядов. Порог зажигания повышен с 50 до 80 Торр, пропуски зажигания отсутствуют.

А.А. Рыбась¹, Я.В. Воронов², А.К. Беляев²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРУГИХ ПРОЦЕССОВ В НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СТОЛКНОВЕНИЯХ СВИНЦА С ВОДОРОДОМ

Настоящее исследование посвящено расчету сечений неупругих процессов, происходящих при низкоэнергетических столкновениях атомов и ионов свинца с водородом и дейтерием ($Pb + H$, $Pb + D$, $Pb^+ + H$, $Pb^+ + D$) в рамках стандартного адиабатического подхода Борна-Оппенгеймера, а также вычислению констант скоростей соответствующих процессов. Молекулярные адиабатические потенциальные энергии квазимолекулы PbH были получены квантово-химическим методом из первых принципов MRCI+Q (Multi Reference Configuration Interaction) для трёх низколежащих ковалентных молекулярных состояний и основного ионного ($Pb(^3P) + H(^2S)$, $Pb(^1S) + H(^2S)$, $Pb(^1D) + H(^2S)$, $Pb(^2P) + H(^1S)$ с учетом тонкой структуры (10 термов в симметрии 1/2, 6 термов в симметрии 3/2 и 2 терма в симметрии 5/2). Энергетические зависимости сечений неупругих процессов рассчитаны с помощью метода ветвящихся токов вероятности в диапазоне энергии столкновения 0,001 –

100 эВ. Также рассчитаны константы скорости неупругих процессов в диапазоне температур 1 000-10 000 К.

А.Б. Сербин^{1,2}, С.Л. Курдубов²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

² Институт прикладной астрономии Российской академии наук

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КВАЗАРА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАРТ РАДИОЯРКОСТИ

Одним из факторов, влияющих на точность координат в каталогах, является задержка сигнала, зависящая от структуры радиоисточника. Многие из внегалактических радиоисточников, задействованных в реализации Международной небесной системы отсчета (ICRF), имеют пространственно-протяжённую структуру, поэтому структурную задержку необходимо учитывать при обработке РСДБ-наблюдений. Однако при моделировании структурной задержки на практике возникают такие проблемы, как помехи на картах радиояркости и изменчивость источника.

В данной работе исследовалась возможность построения многокомпонентной модели источника без использования карт радиояркости. При этом использовались остаточные невязки, полученные после уравнивания геодезических РСДБ-наблюдений. Моделирование проводилось при помощи метода Монте-Карло и градиентного спуска, с использованием алгоритма кластеризации DBSCAN. Структура квазара моделировалась набором точек с тремя параметрами (спектральная плотность потока, прямое восхождение и склонение). В результате проделанной работы был создан алгоритм построения многокомпонентной модели квазаров, которую можно использовать для вычисления структурной задержки.

В.Д. Серов, С.П. Рошупкин, В.В. Дубов, С.Б. Макаров

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РЕЗОНАНСНАЯ КИНЕМАТИКА ПРОЦЕССА ДВУХФОТОННОЙ АННИГИЛЯЦИИ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЙ ПАРЫ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Теоретически изучен процесс резонансной аннигиляции ультрарелятивистской электрон-позитронной пары в два высокоэнергетических гамма-кванта в сильном внешнем электромагнитном поле (модифицированный внешним электромагнитным полем процесс двухфотонной аннигиляции электрон-позитронной пары). В условиях резонанса промежуточное электронное состояние выходит на массовую оболочку. Это приводит к тому, что изначальный процесс второго порядка по постоянной тонкой структуры эффективно распадается на два последовательных процесса первого порядка: стимулированный внешним полем процесс аннигиляции пары (обратный процесс Брейта-Уиллера) и стимулированный внешним полем Комптон-эффект. Детально изучена резонансная кинематика процесса. Показано, что резонансный энергетический спектр конечных гамма-квантов определяется их углами вылета, а также характерными параметрами стимулированных внешним полем обратного процесса Брейта-Уиллера и Комптон-эффекта. Получено резонансное дифференциальное сечение процесса в отсутствие интерференции каналов и показано, что оно может значительно превышать соответствующее сечение без внешнего поля.

Т.Д. Шохин¹, Ю.Е. Чариков², А. Н. Шабалин²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

ПРЕДВЕСТНИКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В УФ И РЕНТГЕНОВСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Рассматривается предвспышечная активность локальных областей на Солнце на часовом временном интервале по данным GOES, SDO/AIA и RHESSI. Феноменологически предвестники - это комплекс явлений на предвспышечной стадии, определяемый, в первую очередь, возрастанием потока излучения в широком диапазоне длин волн. После отбора подобных событий по данным GOES была проанализирована пространственно-временная структура в линиях УФ излучения на данном временном интервале. Высокое пространственное разрешение прибора AIA (~1") позволяет получать динамические изображения в УФ линиях и изменение УФ потока во времени. Дополнительная информация по изображениям в рентгеновском диапазоне была получена из данных наблюдений RHESSI. По магнитограммам прибора HMI/SDO восстанавливалась структура магнитного поля в пакете SolarSoft/GX_Simulator. Для дальнейшего анализа было выбрано событие M3 SOL2014-09-23T23:15. Предвспышечная стадия события характеризуется повышением потока в мягком рентгеновском излучении (предвестник) за 30, 20 и 10 минут до вспышки. Оценка концентрации плазмы в короне на стадии предвестника получена из данных GOES и составляет $3 * 10^{10} \text{ см}^{-3}$ а характерные значения температуры 2.8 МК для предвестника в 22:55 UT.

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ»

О.О. Андреева¹, Н.Д. Баталова¹, М.В. Платонова¹, О.М. Андреев²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

² Федеральное государственное бюджетное учреждение "Арктический и антарктический научно-исследовательский институт"

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОЛЕННОСТИ НА НЕКОТОРЫЕ ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЬДА

Оценка прочностных свойств льда является весьма актуальной при проектировании различных гидротехнических сооружений, расположенных на шельфе или на побережье замерзающих морей РФ. Цель нашей работы состояла в оценке влияния солёности на некоторые прочностные характеристики льда. При этом в качестве прочностных характеристик нами были рассмотрены наиболее востребованные пределы (предел прочности льда на одноосное сжатие и предел прочности на изгиб).

Работа состояла из двух частей. В первой мы проводили эксперименты с лабораторными образцами льда, специально подготовленными (с заданной солёностью) для испытаний. Во второй части мы обрабатывали материалы полевых измерений прочностей льда, полученных в Арктике сотрудниками ААНИИ. Чтобы проследить зависимость прочности льда от его солёности были проведены опыты с образцами пресного и соленого льда на сжатие и на изгиб с помощью ручного гидравлического пресса и специальной испытательной машины. Обобщая полученные результаты, нам в первом приближении удалось получить некоторые зависимости, связывающие пределы прочности льда с его солёностью. В целом они показывают, что предел прочности пресного льда на сжатие в несколько раз выше предела прочности соленого льда. Этот же вывод можно сделать и относительно предела прочности льда на изгиб. Таким образом, нами получено, что с ростом солёности льда его прочность снижается.

Е.Д. Назарова, В.Ю. Филин

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА И МЕТАЛЛА ШВА ДЛЯ КЭ-РАСЧЕТОВ ПОЛЕЙ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ

Использование известных температурных зависимостей модуля Юнга, предела текучести и температурной деформации не даёт корректного результата моделирования сварки при КЭ расчете. В связи с этим было решено составить методику внесения изменений в эти свойства с учетом фазовых превращений и особенностей конечно-элементного анализа для получения реальных сварочных перемещений и напряжений. В работе рассмотрен случай полуавтоматической сварки.

Поставлен эксперимент, где в процессе сварки таврового соединения определялись перемещения на одном из концов. Полученные данные для перемещений легли в основу создания цифрового двойника. Исследуемый материал: высокопрочная сталь 09ХН2МД, с пределом прочности 790 МПа.

ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗОРИЕНТИРОВОК ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Предметом исследования являлось распределение разориентировок между элементами структуры поликристаллического материала. Необходимо было установить, как наличие преимущественной ориентировки кристаллической решетки, то есть наличие текстуры, влияет на характер распределения разориентировок. Предложен метод численного моделирования распределений ориентировок и разориентировок кристаллитов, который был протестирован на примере бестекстурного материала, после чего разработана программа для генерации случайных ориентировок зерен в металлах, имеющих аксиальную текстуру. Рассчитаны возможные распределения разориентировок в материалах с аксиальной текстурой в зависимости от типа и остроты текстуры. Как и следовало ожидать, при усилении остроты текстуры увеличивается отличие от хаотического распределения разориентировок. Показано, что распределения разориентировок, возникающие в материале с однокомпонентными текстурами $\langle 111 \rangle$ или $\langle 100 \rangle$ близки друг к другу. При наличии двухкомпонентной текстуры $\langle 111 \rangle + \langle 100 \rangle$ возникает характерный малоугловой максимум в распределении разориентировок. В то же время, двухкомпонентная текстура значительно меньше искажает распределение, чем однокомпонентная при той же степени остроты текстурных компонент.

Д.В. Троцкая, С.А. Филиппов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ПОЛИРОВКИ ОБРАЗЦОВ

В представленной работе предложена методика электрохимического полирования образцов никелевого жаропрочного ренийсодержащего сплава ЖС32-ВИ. В ходе работы были решены следующие задачи:

- Изучены методики пробоподготовки для проведения металлографических исследований и теория электрохимического полирования.
- Подобран состав электролита и режим электрохимического полирования на основании полученных экспериментально вольт-амперных характеристик.
- Проведено электрохимическое полирование.

Эффективность проведённого полирования оценивалась с помощью нескольких независимых методов:

- скорость изменения толщины образца определялась микрометрическим методом;
- степень дефектности поверхности оценивалась с помощью микроскопического исследования;
- глубина наклёпанного при механической шлифовке слоя оценивалась с помощью метода рентгеноструктурного анализа.

В результате была разработана методика электрохимического полирования сплава ЖС32-ВИ, включающая в себя состав электролита и оптимальные значения напряжения и плотности тока.

ДИСЛОКАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ НЕСООТВЕТСТВИЯ В ДВУХСЛОЙНОМ ЦИЛИНДРЕ

В докладе рассмотрен механизм релаксации напряжений несоответствия в двухслойном цилиндре, предполагающий образование прямолинейной дислокации несоответствия на межфазной границе вдоль оси цилиндра. Для определения необходимых условий релаксации по такому механизму был использован энергетический критерий. Модель строилась в рамках изотропной линейной теории упругости при предположении о равенстве упругих свойств слоев. Для расчета использовалось известное решение краевой задачи о дислокации в цилиндре, с помощью которого была рассчитана собственная энергия дислокации и энергия ее взаимодействия с полями несоответствия. В результате получено аналитическое выражение для критического несоответствия в зависимости от параметров системы. Показано, что критическое несоответствие практически не зависит от относительных размеров слоев и определяется прежде всего радиусом цилиндра. Полученные результаты позволяют прогнозировать появление дислокаций несоответствия определенного типа в двухслойных цилиндрических нанонитях.

Д.Р. Бараков, В.Ю. Филин
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В ОБРАЗЦЕ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ТЕМПЕРАТУРУ НУЛЕВОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ

Хладостойкие судостроительные стали являются крайне ценным материалом в отрасли судостроения. Их использование необходимо для создания конструкций таких судов, как атомный ледокол «Лидер», способных выдержать высокие нагрузки в условиях экстремально низких температур, вибраций и коррозии. Корпусные материалы должны проходить специальные механические испытания, одним из которых является испытание по определению температуры нулевой пластичности (NDT), и удовлетворять соответствующим требованиям, на основании которых они будут допущены к эксплуатации. Поэтому было предпринято расчетно-экспериментальное исследование с целью обоснования требуемой NDT. В качестве материалов для исследования выбраны арктическая сталь марки F460^{Arctic30} и высокопрочная сталь 09ХНЗМД.

В работе представлены результаты численного моделирования МКЭ и испытаний по определению температуры NDT. При численном моделировании образца рассматривали только условие хрупкого разрушения по достижению сеточно зависимой жесткости напряженного состояния ($\frac{\sigma_1}{\sigma_i}$) в силу его наиболее вероятной реализации по сравнению с критериями вязкого разрушения при низких температурах (порядка -75°C). В целях установления корреляции жесткости напряженного состояния с коэффициентом интенсивности напряжений (КИН) для каждого из исследованных материалов выполнено решение калибровочных задач с тем же размером КЭ, для которых имеется известная формула для КИН.

Сравнение критических значений КИН, соответствующих распространению трещины по сечению образца NDT и торможению трещины в конструкции, позволяет перейти к

назначению требуемого запаса между температурами, соответствующими величинам КИН для этих событий.

Р.О. Черчиев, А.А. Лаврентьев, Д.Р. Бараков
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

ИССЛЕДОВАНИЕ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СТАТИЧЕСКУЮ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При разработке и производстве конструкций ответственного значения, работающих при высоких нагрузках и низких температурах, особое внимание уделяется эксплуатационным характеристикам, в том числе статической трещиностойкости, которая характеризуется такими параметрами как критическое значение коэффициента интенсивности напряжений (K_{Ic}), J -интеграл и критическое значение раскрытия вершины трещины (CTOD). Эти параметры определяются при испытаниях образцов натурной толщины. Проведение испытаний на статическую трещиностойкость образцов разных размеров, дают отличающиеся значения параметров трещиностойкости. К разнице в регистрируемых характеристиках приводит явление масштабного эффекта. Существуют несколько гипотез о природе данного эффекта: металлургическая, статистическая и связанная с объемностью напряженно-деформированного состояния (НДС) вблизи трещины. В настоящей работе рассматривается последняя гипотеза и анализируется связь особенностей НДС образцов разного размера с проявлением масштабного эффекта при испытании на статическую трещиностойкость.

В рамках работы получены результаты моделирования в ANSYS Mechanical APDL трехточечного изгиба образцов типа SENB с краевой трещиной, а также выполнен анализ их НДС в разных сечениях. Испытанные образцы были изготовлены из высокопрочной стали 10ХН4МДФ. В процессе испытания моделировались образцы одного и того же типа, но разных размеров, для которых получены реальные значения параметров трещиностойкости по результатам механических испытаний. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методического подхода к оценке статической трещиностойкости конструкций на базе испытаний маломасштабных образцов.

С.А. Красницкий^{1,2}, А.М. Смирнов², М.Ю. Гуткин^{2,4}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, ²Университет ИТМО,

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

⁴Институт проблем машиноведения РАН

НЕРАВНОВЕСНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ВНУТРЕННИХ ПОЛОСТЕЙ В ИКОСАЭДРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦАХ

В данной работе кинетика эволюции пор в икосаэдрических частицах ГЦК металлов рассматривается в рамках принципов неравновесной термодинамики. Эволюционное уравнение поры получено из второго начала термодинамика для необратимых процессов. Упругая энергия, запасаемая остаточными напряжениями в икосаэдрических частицах, определена в рамках дисклинационного представления Маркса-Иоффе, приращение диссипации за счет изменения размера поры – в рамках формализма Онзангера. В результате анализа определены сценарии эволюции поры в икосаэдрических частицах, найдены

критические и оптимальные параметры процесса, построены кинические кривые роста (стягивания) пор и представлено сравнение с данными экспериментальных исследований. В частности, показано, сценарий эволюции поры во многом определяется ее начальным размером и свойствами материала частицы: поры относительно большого размера стремятся принять устойчивую конфигурацию, характеризующуюся некоторым равновесным размером, в то время как, поры относительно малого размера неустойчивы и стремятся раствориться.

Исследование выполнено при поддержке Российского Научного фонда (грант № 22-11-00087).

А.Е. Петер¹, С.А. Красницкий^{2,3}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Санкт-Петербургский государственный университет

³Университет ИТМО

ЭФФЕКТИВНАЯ ВЯЗКОСТЬ СУСПЕНЗИИ ТОРОИДАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

В данной работе методы микромеханики неоднородных сред применяются для определения эффективной вязкости в суспензии с частицами тороидальной формы. Полученное ранее аналитическое решение для упругой матрицы, содержащей жесткие тороидальные включения, используется для определения компонентов тензора вклада эффективной вязкости в рамках аналогии между граничными задачами теории упругости и динамики вязкой несжимаемой жидкости. В частности, показано, что компоненты тензора вклада эффективной вязкости уменьшаются при увеличении отношения радиуса поперечного сечения тора к его размеру. Кроме этого, показано, что в приближении «невзаимодействующих частиц» эффективная вязкость дисперсной среды возрастает с увеличением количества частиц.

Д.И. Садыков^{1,2}, Т.С. Орлова^{1,2}, М.Ю. Мурашкин¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

² Университет ИТМО

ВЫСОКОПРОЧНЫЙ И ПЛАСТИЧНЫЙ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЙ СПЛАВ Al-Mg-Zr ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

На сегодняшний день одной из важных задач физического материаловедения является разработка легких и высокопрочных проводниковых и конструкционных материалов, способных эксплуатироваться при низких и криогенных температурах. В рамках настоящей работы представлены результаты по влиянию температуры деформации в диапазоне 77–293 К на механические свойства ультрамелкозернистого (УМЗ), низколегированного сплава Al-0.95Mg-0.32Zr (масс. %), структурированного методом кручения под высоким давлением (КВД), в состояниях до и после специальной деформационно-термической обработки (ДТО), состоящей из кратковременного низкотемпературного отжига и дополнительной небольшой деформации методом КВД. Показано, что после ДТО исследуемый УМЗ Al-Mg-Zr сплав демонстрирует сочетание высокой прочности (370–490 МПа) и увеличенной более чем на порядок пластичности (7–13 %) во всем исследуемом диапазоне температур деформации. В интервале температур 243–293 К впервые обнаружен нетипичный характер изменения

механических свойств (прочности и пластичности), что не характерно для крупнозернистых и других УМЗ сплавов на основе Al. Предложено возможное объяснение этих аномальных температурных зависимостей прочности и пластичности.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-19-00292).

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЁТКИХ МНОЖЕСТВ В ЗАДАЧАХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Нечёткие множества являются одним из способов описания неопределённости данных. Нечёткие множества являются одним из наиболее емких способов описания неопределённости данных. В работе исследуется описание данных по управлению шаговыми двигателями (ШД) в режиме дробления шага. Дробление является источником неточности, затрудняя исследование и прогнозирование. Рассматриваются данные полученные при различной дискретности обработки полного шага $(\frac{1}{8}, \frac{1}{64}, \frac{1}{256})$. Отдельный интерес также представляет сравнение полного хода ШД вперед и назад в ходе одного непрерывного замера, так как из-за упомянутой неточности ШД не возвращается в исходное положение. В работе приведен метод построения нечетких данных на основе четких, однозначно делимых на уровни.

Представлен способ прогнозирования положения вала ШД с помощью классических методов регрессионного анализа, примененных к нечетким данным. Приведен способ анализа степени неопределенности результата с помощью получения внутренней и внешней интервальных оценок из нечеткого числа с последующим вычислением меры Жаккара для полученного твина.

РЕГУЛЯРНЫЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ АТТРИБУТИРОВАННОГО ТЕКСТА

В работе рассматривается проблема автоматизации предметных областей. Стандартным методом решения этой проблемы являются языки предметных областей. Работа посвящена методу повышения выразительности формальных языков – использование текста с атрибутами для записи программ. Описанный подход развивает общепринятую на сегодняшний день практику написания программ в интегрированных средах разработки (ИСП) – в них тексты отображаются с атрибутами, которые среда восстанавливает по тексту программы и грамматике языка. Преимущества метода:

1. Уменьшается размер программ за счёт сокращения ключевых слов языка. Соответственно упрощается чтение программ.
2. Упрощается описание строковых констант – становится не нужно экранирование.
3. Появляются возможности для внедрения новых практик кодирования для улучшения читаемости кода. Например, становится возможно группировать переменные по их цвету.

Для поддержки метода предложены регулярные выражения над атрибутированным текстом как средство создания лексических анализаторов формальных языков. В работе:

1. Описано расширение существующих популярных языков регулярных выражений для поддержки атрибутов символов текста.
2. Описана архитектура модуля регулярных выражений.

А.А. Гольдберг, С.А. Климова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДУЛЯЦИОННОЙ МЕТОДИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРОДОЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИИ ПРИ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЕ ЖИДКИХ СРЕД

Одной из задач ядерного магнитного резонанса (ЯМР) при исследовании конденсированных сред является определение времен продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации, особенно важно при использовании малогабаритных ЯМР-релаксометров для экспресс-контроля состояния конденсированных сред. В случае экспресс-контроля регистрация сигнала ЯМР происходит в слабом магнитном поле с $B < 100$ мТл (ограничен вес конструкции устройства) с использованием независимого источника питания. В связи с этим возникают проблемы при использовании импульсных методов (Ханн и Карр-Спиновое эхо Перселла) в небольших портативных ЯМР-релаксометрах для измерения T_1 и T_2 . Трудности возникают с измерением T_1 . Это связано с тем, что экспериментальные исследования показали, что для определения T_1 в конструкции малогабаритного ЯМР-релаксометра чрезвычайно сложно использовать измерения частоты по методу Джилотто. Учитывая все факторы в уравнениях Блоха, мы получили формулу для определения T_1 по двум измерениям амплитуды сигнала ЯМР на разных частотах модуляции τ . Существуют некоторые случаи, когда уравнение решений не имеет. В таком случае оно преобразуется к другому виду. Рассмотрено аналитическое решение для конкретного случая.

А.И. Иванов, А.Н. Баженов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИИНТЕРВАЛОВ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Мультиинтервальные конструкции естественным образом возникают в различных физических задачах, а также при анализе выборок данных с двусторонними ограничениями. Рассмотрено применение подхода для описания спектрального состава примесей водородной плазмы токамака “Глобус-М2” ФТИ им.А.Ф.Иоффе. В качестве одного из возможных методов анализа предложено применение алгоритма поиска мультимоды, рассматриваемой в виде мультиинтервала, с последующей аккумуляцией значений в соответствии с показаниями, полученными в течение длительного времени. Такой способ позволяет повысить точность определения спектров веществ, так как в процессе накопления значений, входящих в составные интервалы результирующего мультиинтервала, происходит уточнение границ длин волн, что позволяет с большей точностью установить наличие вхождения конкретного вещества с соответствующей степенью ионизации. Установление вхождений тех или иных веществ производится путем сопоставления полученных результатов с табличными значениями, полученными из базы данных из NIST (National Institute of Standards and Technology).

А. Колосков, С.В. Лупуляк
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ СБОРКИ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ АДГЕЗИИ

В докладе рассматриваются результаты моделирования процесса сборки авиационных конструкций в присутствии адгезивной среды (клея, герметика). В первой части доклада дается краткий обзор используемой модели адгезии (эволюционная интерфейсная модель Фремо), рассказывается о сравнительных с другими моделями преимуществах и о физической интерпретации ее параметров. Во второй части описывается экспериментальный стенд, имитирующий сборку гибкой авиационной панели и неподвижного основания, ставится численный эксперимент по исследованию влияния параметров модели адгезии на результаты сборки, описывается используемый в реализации подход, основанный на разделении задачи на характерные подзадачи. В завершении анализируются результаты эксперимента, рассказывается о проблемах, возникших в численном моделировании и их решении. В частности, рассматривается вопрос выбора параметров дискретизации по времени, обеспечивающих стабильность численной процедуры.

Р.А. Красников, С.М. Бакланов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОГО ГРАДИЕНТНОГО МЕТОДА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ СБОРКИ

В докладе представлено сравнительное исследование модификаций быстрого градиентного метода по влиянию на время решения задач квадратичного программирования, возникающих при моделировании процесса сборки. В первой части доклада обсуждается постановка прямой задачи, а также двойственной к ней, приводятся схемы метода проекции градиента и быстрого градиентного метода. Во второй части доклада к рассмотрению предлагаются результаты численных экспериментов для быстрого градиентного метода. Для метода с постоянным шагом проводится анализ влияния параметров метода на скорость вычислений. В качестве возможного улучшения быстрого градиентного метода предлагается схема с перезапусками, исследуется влияние перезапусков на сходимость. Для метода с непостоянным шагом сравниваются различные схемы выбора шага: правило Армихо и методы одномерной минимизации. В заключении проводится сравнительный анализ наиболее успешных модификаций быстрого градиентного метода на тестовых задачах сборки.

К.С. Куксенко, А.Н. Баженов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИМЕНЕНИЕ ТВИНОВ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДАННЫХ И ВЫЧИСЛЕНИЙ

Представлен математический аппарат решения задач идентификации масс-спектров важного класса органических веществ --- нейромедиаторов, с использованием методов интервальной статистики и инструментов интервального анализа. Вычисления проводятся в полной арифметике Каухера, производится одновременная внутренняя и внешняя оценка

результатов вычислений, результаты представляются в форме составных интервальных объектов – твинов.

В докладе рассмотрен пример определения концентрации вещества каждого нейромедиатора в смеси путём решения переопределённой прямоугольной интервальной системы линейных алгебраических уравнений (ИСЛАУ). Для решения ИСЛАУ использовались субдифференциальный метод Ньютона и метод квадратных матриц. Рассмотрено две модификации метода квадратных матриц – вероятностный метод и диагональный метод, и приведено их описание.

Представлены результаты решения переопределённой ИСЛАУ и получены внутренние и внешние интервальные оценки значений переменных для обеих модификаций метода квадратных матриц. Произведено сравнение результатов, полученных вероятностным и диагональным методами, при решении разрешимых и неразрешимых, в классической интервальной арифметике, ИСЛАУ.

Т.А. Харисова, Ф.А. Новиков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИМЕНЕНИЕ УСЛОВНЫХ РЕГУЛЯРНЫХ ВЫРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ВЕРИФИКАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТНЫХ ПРОГРАММ

В данной работе для анализа дискретных систем управления применяется формальный подход, основанный на кооперативно взаимодействующих автоматных объектах, определенных на языке CIAO (Cooperative Interaction Automata Objects). Поведение всей системы складывается из поведения автоматных объектов, взаимодействующих через определенные интерфейсы. Поведение каждого объекта описывается специальным автоматом, представленным графом переходов состояний, переходы которого нагружены действиями со сторожевыми условиями. Для целей верификации системы управления элементарные действия рассматриваются как символы конечного алфавита, последовательности действий (протоколы выполнения) образуют слова в этом алфавите, все множество последовательностей действий составляет некоторый язык (семантику системы). Тогда требования к системе (то есть спецификация) представляют собой утверждения о структуре слов этого языка. Рассматривается случай, когда спецификация задается условными регулярными выражениями, определяющими допустимые (недопустимые) последовательности событий (действий). В этом случае задача верификации системы сводится к проверке того, что все слова семантики системы принадлежат языку, заданному условными регулярными выражениями спецификации системы.

Т.Д. Шохин, С.В. Божокин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

В данной работе была применена теория вейвлет-анализа для нахождения количественных параметров описания турбулентности сердечного ритма (HRT), учитывающих нарушение периодичности между сердечными ударами. Для описания сердечного ритма с *HRT* была предложена модель нестационарного частотно-модулированного сигнала (*ЧМС*), представляющая собой суперпозицию отдельных

гауссовских пиков одинаковой амплитуды, центры которых на временной шкале совпадают с истинными моментами ударов сердца. Для такой модели с сильным нарушением периодичности следования гауссовских пиков получено аналитическое выражение для непрерывного вейвлетного преобразования. С помощью данного преобразования была вычислена функция $F_{max}(t)$, описывающая поведение локальной частоты во всем промежутке времени, содержащем экстрасистолю и компенсаторную паузу. Данная функция сравнивается с такими традиционными количественными параметрами классификации различных типов аритмий, как начало турбулентности (*Turbulence Onset* - *TO*) и наклон турбулентности (*Turbulence Slope* - *TS*). Предлагаемый метод расчета $F_{max}(t)$ может быть применен для анализа нестационарной ритмограммы для пациентов, страдающих аритмиями сердца, сердечной недостаточностью или фибрилляцией желудочков сердца и предсердий.

Т.О. Яворук, А.Н. Баженов
Университет ИТМО

ПРИЛОЖЕНИЕ ТВИННЫХ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

В прикладных задачах часто возникают системы линейных алгебраических уравнений, связанные с анализом данных, полученных с приборов. Данные, полученные путём измерений или вычислений на основе измерений, всегда имеют погрешность, которую можно выразить с помощью интервалов. Таким образом, используя методы интервального анализа, можно получить внешние оценки. Кроме внешнего оценивания, которое позволяет получить все возможные решения, важным вопросом является нахождение внутренних оценок – некоторое множество, которое содержит решения в более узком смысле. Данный вопрос интересен практически во всех областях, связанных с оцениванием и сравнением множеств решений и численных методов.

В работе рассматривается применение составной интервальной алгебраической структуры – твина, состоящей из двух интервалов, для решения задач линейной регрессии. Исследуются вопросы интерпретации систем линейных алгебраических уравнений, элементами, которой являются твины и способы получения внутренних оценок.

Б.М. Габдрахманов, А.Н. Баженов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

НЕСИММЕТРИЧНЫЕ МЕРЫ СОВМЕСТИСТИ В АНАЛИЗЕ ДАННЫХ.

Прослеживаемость изотопной подписи для различных классов органических соединений является важным инструментом анализа данных в науках о Земле. При детальном анализе происхождения пробы новым методом описания относительной доли различных стабильных изотопов является применение несимметричных мер совместности в полной арифметике Каухера.

В работе рассмотрено применение подхода для стабильных изотопов серы. Особое внимание уделяется математическим аспектам анализа, включая формулы для индекса Жаккара $J(X, Y) = |X \cap Y| / |X \cup Y|$, адаптированные для изотопных данных через несимметричные меры совместности. Эти меры, в частности, позволяют оценить степень

перекрытия между изотопными подписями различных образцов, обеспечивая глубокое понимание источников и путей миграции органических веществ.

Развитие подходов в полной арифметике Каухера для анализа изотопных данных открывает новые возможности для точного определения геохимических процессов, влияющих на изотопный состав серы и других элементов. Этот методологический прогресс способствует уточнению моделей глобального цикла элементов в биосфере и атмосфере, а также разработке новых инструментов для экологического мониторинга и палеоклиматических исследований.

СЕКЦИЯ «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ МАТЕМАТИКИ И ФИЗИКИ»

К.А. Ворчалов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА В ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

В работе исследуется алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) – метода, позволяющего вычислять дискретное преобразование Фурье за время $O(n \log n)$, и использование БПФ в веб-приложении для создания визуализатора. При разработке веб-приложения используется библиотека Web Audio API, которая расширяет возможности для работы со звуком в браузере.

Д.В. Середа

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МЕТРИЧЕСКИЕ ПРОСТРАНСТВА И ИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ: КАКИЕ КРИВЫЕ МОГУТ БЫТЬ ОКРУЖНОСТЯМИ?

В работе исследуется вопрос о возможности интерпретации заданной кривой как окружности некоторой двумерной метрики. Показывается, что простейшими преобразованиями координат («сжатие» одной из осей и повороты) из известной непрерывной метрики можно получить метрику с окружностью, близкой по виду к произвольно направленному радиус-вектору. На основе манхэттенской метрики строится метод приближения, позволяющий для широкого класса замкнутых кривых получить метрику со сколь угодно близкой к этой кривой окружностью. Главная идея метода — взвешенная сумма метрик также является метрикой. Принципиальные ограничения: (1) кривая должна быть представима в полярных координатах как график однозначной функции $r(\varphi)$; (2) метод не гарантирует, что предельное выражение будет метрикой, из-за вырождения слагаемых. Приводятся примеры работы метода для трапеции, синусоидальной спирали и сложного контура, близкого к форме бабочки, и примерный вид геодезических в пространствах с соответствующими метриками. Показывается, что для незамкнутых кривых полученный метод мало применим, но может быть обобщён с помощью анализа таких экзотических окружностей, как пара параллельных отрезков (в сферических координатах), набор гипербол (метрика $d(p, q) = \sum \ln(1 + |p_n - q_n|)$). На примере окружности дискретной метрики — плоскости с выколотой точкой — ставится вопрос о возможности представления произвольного г.м.т. как окружности. В заключение делается вывод о крайней нетривиальности геометрии метрических пространств.

М.И. Дмитриев, В.О. Кузнецова, В.В. Гарбарук

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

ОЦЕНКА РИСКОВ КОЛЛЕКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ

В процессе управления каждое решение может иметь как положительные, так и отрицательные последствия. В качестве числовой характеристики риска принимается вероятность того, что принятое решение приведет к негативным последствиям.

Коллективные решения принимаются по результатам голосования на совещании группы специалистов, которые называют научно-техническим советом, медицинским консилиумом и т.п. Принятие решения на совещании зависит как от уровня компетентности членов совещания, так и от численности голосующих.

В работе сначала рассматривается простейшая схема принятия коллективного решения на совещании с нечетным числом участников n , каждый из которых принимает правильное решение с вероятностью p . При сделанных предположениях процесс принятия решений укладывается в схему Бернулли. Величина $m = (n - 1)/2$ задает максимальное количество участников совещания, которые могут проголосовать правильно, но при этом будет принято неверное коллективное решение. Построены кривые снижения риска при повышении уровня компетентности p и увеличения численности голосующих n . Исследуются также случаи голосования при наличии нескольких групп с разным уровнем компетентности p_i , которые можно оценить статистически по ранее принятым решениям.

М.Д. Макаров, В.Ю. Кожевникова, Д.А. Тархов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИМЕР СВЕРХПРОГНОСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТОДА ЭЙЛЕРА

В данной работе был исследован пример многослойной модели, построенной на основе применения классических численных методов к интервалу переменной длины. Некоторый объект был промоделирован задачей Коши для обыкновенного дифференциального уравнения. Так как модель содержала различные допущения, она оказалась не точной, поэтому нами дополнительно рассматривается модель, в соответствии с которой на самом деле изменяется объект.

Помимо начального условия мы рассматриваем единственную известную точку, для которой подбираем точное решение, проходящее через неё. В результате исследования и применения явного и неявного методов Эйлера для решения поставленной задачи мы выясняем, что полученный результат противоречит ожидаемому решению дифференциального уравнения, которым мы изначально описывали объект. Таким образом, рассмотренный пример демонстрирует сверхпрогностические свойства метода Эйлера.

К.Д. Кондратьев, Б.С. Тёрушкин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ СВЯЗИ. ПРОВЕРКА НЕКОТОРЫХ ФОРМУЛ КИНЕМАТИКИ В ПОДВИЖНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ПРИ ИЗУЧЕНИИ МАТЕМАТИКИ.

Роль междисциплинарных связей при обучении трудно переоценить. С одной стороны, специалисту в предметной области нужно владеть приёмами математики, с другой стороны, примеры из предметной области являются стимулом для изучения самой математики.

Данная работа посвящена частному вопросу связи преподавания математики и физики – проверке формул физики (раздел кинематика в механике материальной точки) аппаратом математики на простом частном случае.

В работе проверяются соотношения кинематики $a_n = \frac{v^2}{R}$ и $a_{tg} = \frac{d|\vec{v}|}{dt}$ с помощью методов векторной алгебры и математического анализа при изучении темы «Применение частных производных функций, заданных параметрически. Кривизна плоской прямой. Касательная и нормаль к плоской кривой». Рассматривается общий алгоритм нахождения

нормального и тангенциального ускорения двумя разными способами при заданных параметрически уравнениях движения, и, для лучшего усвоения, его реализация на простейшем примере. Изложение выполнено в виде презентации с подробными пояснениями и апробировано на лекции и на практических занятиях.

Д.В. Бутусов, М.Р. Бортковская
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕРПОЛЯЦИИ И АППРОКСИМАЦИИ

Интерполяция – способ нахождения промежуточных значений величины по имеющемуся дискретному набору известных значений.

1) Линейная интерполяция: простейший вид интерполяции, подразумевающий под собой построение ломаной линии, состоящей из отрезков прямых, проходящих через пары полученных точек (x, y) . Нахождение приближенных значений функции проводится либо подстановкой определенного значения аргумента в уравнение прямой, соответствующей участку, либо графически.

2) Интерполяционный многочлен Лагранжа: данный метод представляет из себя подстановку определенного значения аргумента в многочлен n -й степени (n -количество известных точек) такой, что его значения при известных x равны соответствующим значениям y (то есть, в этих точках значения полинома должны совпадать со значениями функции).

3) Многочлен Ньютона: данный метод предполагает подстановку определенного значения аргумента в многочлен n -й степени с определяющимися в конкретном случае коэффициентами a . Для большей точности и удобства используются так называемые первая и вторая (для левой и правой частей интервала значений соответственно) интерполяционные формулы Ньютона.

Аппроксимация: данный метод менее точный, чем интерполяция, но он позволяет увидеть поведение функции, а также, порой, оценить погрешность входных данных. В данном случае подбирается максимально простая приближенная функция (аппроксимирующая), которая проходит не через узлы интерполяции, а между ними.

В.В. Паламарчук, Д.А. Тархов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЗАДАЧА ПОСТРОЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ РАЗВОДНОГО МОСТА

Ранее были проведены работы по аппроксимации нелинейной механической характеристики двигателя разводного моста с применением нейросетевого метода, где применялись классический метод наименьших квадратов, численный метод Эйлера, и нейросетевое моделирование. В ходе проведения исследования было получено более точное решение с применением нейросетевого метода по сравнению с классическими методами.

Разводной мост представляет собой высокотехнологичную инженерную конструкцию, обладающую уникальными характеристиками. Они предназначены для пересечения водных преград и обеспечения проезда судов в местах с интенсивным морским или речным трафиком. Каждый разводной мост – это результат длительного исследования и разработки, учитывающий факторы, такие как плавучесть, нагрузка, скорость ветра и многое другое. Компонентами разводного моста являются насос с регулятором, клапан давления, нерегулируемый насос управления, клапан подпитки, гидроцилиндр, трубопровод и

гидрораспределитель. Ключевой задачей моделирования разводного моста, как комплексной инженерной системы, является создание нейросетевой модели для обеспечения наиболее точных и оперативных решений с минимальными затратами. Для начала необходимо построить нейросетевые модели для каждого объекта и на их основе построить общую нейросетевую модель моста с учетом динамики нагрузки, ветра и т.д.

А.П. Корчагин, Д.А. Чернуха, А.В. Ащеулов, Д.А. Тархов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОЛУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИ КЛАПАНА ПОДПИТКИ

Современный подход к моделированию сложных объектов зачастую включает в себя использование нейронных сетей. Нейронные сети, являясь передовым методом для решения инженерных задач, способны обрабатывать большие объемы информации, поступающие от систем датчиков, выявлять и аппроксимировать нелинейные зависимости и участвовать в решении задач управления в связи с возможностью адаптировать решение к быстро изменяющимся условиям. В данной работе рассматривается возможность применения данного метода на примере широко распространенного механизма - клапана подпитки, который является составной частью многих, в том числе сложных, инженерных систем. В гидротехнических системах, где происходят быстрые изменения давления, необходимость в оперативном реагировании и устойчивом поддержании заданного уровня давления среды в гидроприводе возлагается именно на клапан подпитки.

Для получения приближенного функционального решения нелинейной системы дифференциальных уравнений, описывающих модель клапана подпитки, предлагается использовать известные формулы численных методов, применяемых к интервалу времени переменной длины. Коэффициенты уравнения в общем случае являются функциями времени и физические величины, в них входящие, в реальном объекте могут определяться системой датчиков. Величины, которые выступают в качестве неизвестных – перемещение запорного органа клапана подпитки и расход рабочей жидкости, являются ключевыми параметрами при решении задачи управления эффективным уровнем давления в системе. В качестве метода аппроксимации реальных данных используется многослойная нейронная сеть типа персептрон.

И.М. Куликовских
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ТЕОРЕМА МИНКОВСКОГО О МНОГОГРАННИКАХ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЕ К РЕШЕНИЮ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ НЬЮТОНА «О ПОВЕРХНОСТИ НАИМЕНЬШЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ»

Эта обзорная работа посвящена решению задачи Ньютона по поиску поверхности наименьшего сопротивления с помощью теоремы Минковского о выпуклых многогранниках. В этой работе мы рассмотрим различные геометрические формы и силу сопротивления, которая возникает во время их поступательного движения в некоторой однородной среде. При движении в пространстве о тело ударяется множество частиц, и при ударе возникает сила, противодействующая движению, которая зависит от формы тела. Мы можем рассмотреть с помощью теоремы Минковского различные геометрические тела как

выпуклые многогранники и найти поверхность, имеющую наименьшее сопротивление при движении в однородной среде. В этой работе мы также знакомимся с доказательством применяемой теоремы Минковского и некоторыми основными следствиями, которые составляют основу теории многогранников. Результаты решения задачи Ньютона «о поверхности наименьшего сопротивления», полученные как самим Ньютоном, так и другими учеными, имеют неоспоримую ценность в науке и технике. Благодаря этим результатам инженеры могут проектировать поверхности оптимальной формы при конструировании кораблей, машин, ракет и подобных движущихся тел.

Т.В. Лазовская, В.В. Паламарчук, Е.М. Разумов,
А.А. Сергеева, Д.А. Тархов, М.А. Чистякова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИМЕНЕНИЕ И СРАВНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ И ОСНОВАННЫХ НА АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ АНАЛИЗА НЕЛИНЕЙНОГО ИЗГИБА КОНСОЛЬНОГО СТЕРЖНЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Математические модели помогают исследовать многие физические объекты и их поведение. В условиях реальной жизни каждый образец имеет уникальные параметры, влияющие на его поведение. Задача данной работы – научить нейросеть точно подбирать необходимые коэффициенты для описания поведения конкретного образца со всеми его особенностями.

Рассматриваемый процесс – нелинейный прогиб консольного стержня. Были использованы полученные из эксперимента с нагружением свободного конца трубки данные. Исходные данные – набор координат, характеризующих положение точек стержня в зависимости от приложенной нагрузки. Выбранная математическая модель – уравнение большого статистического прогиба.

В ходе работы были построены приближенные нейросетевые решения поставленной задачи. Первый вариант – нейронная сеть вида $\theta = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i \varphi_i(z)$.

Весы сети подбираются, минимизируя соответствующий функционал ошибки, случайно выбирая пробные точки внутри промежутка через 5 шагов линейной оптимизации.

Второй вариант – две модели на основе аналитической модификации численных методов. Первая была получена двукратным применением непрерывного метода Эйлера к дифференциальному уравнению. Вторая – при применении на первом шаге исправленного метода Эйлера, а на втором – метода средней точки. Преобразования привели к задаче линейной регрессии.

Все методы дают достаточно точное приближение. Наиболее стабильны модели, полученные из аналитических модификаций численных методов. Они более простые, результат получается почти мгновенно. Нейросетевые модели менее стабильны, требуют больший интервал времени, но часто дают более точные приближения, особенно для небольших весов.

А.В. Ащеулов, М.Д. Закирова, А.А. Лавыгин, О.А. Скрипкин, Д.А. Тархов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВНЫХ БЛОКОВ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА

Применение нейронных сетей в комплексных инженерных системах становится все более востребованным в современном мире благодаря высокой эффективности данного подхода при учете динамических нагрузок и изменяющихся параметров. Электродвигатель представляет научный интерес для исследования с помощью нейронных сетей благодаря своему включению во множество динамических систем и процессов. Предполагается дальнейшее интегрирование нейросетевых моделей отдельных компонентов сложных систем с целью создания цифровых двойников, объектов с нелинейным поведением, которые позволят производить непрерывный мониторинг совместно с широкой сетью датчиков и дадут возможность эффективно и оперативно управлять сложной системой.

Механическая характеристика электродвигателя — это функция, отображающая зависимость величины момента от скорости вращения. Эта характеристика позволяет оценить работу двигателя при различных нагрузках и оптимально спроектировать систему. В данной работе получены аппроксимации механической характеристики параболой с помощью классического метода МНК, а также суммой гиперболических тангенсов с помощью нейронной сети. Далее было получено приближенное функциональное решение нелинейного дифференциального уравнения, описывающего работу электродвигателя, для двух аппроксимаций. Решение построено с помощью многослойной модели, основанной на применении сеточных методов к интервалу времени переменной длины. На основе полученных результатов были определены наилучшие способы аппроксимации механической характеристики на различных интервалах изменения частоты электродвигателя.

М.Д. Закирова, А.А. Лавыгин, О.А. Скрипкин, Д.А. Тархов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВОГО МЕТОДА

В современном мире существует множество неустойчивых систем, требующих стабилизации. Управление такими системами представляет собой важную проблему, обусловленную сложностью нелинейных уравнений, описывающих их поведение, а также различиями между реальными и математическими моделями. Существуют различные подходы к управлению подобными системами. В данной работе рассматриваются два подхода к определению оптимальных шагов управления: линеаризация и применение модифицированного метода Эйлера к системе, описывающей поведение подобной нелинейной системы на примере обратного маятника. Были проведены вычислительные эксперименты, показавшие эффективность метода Эйлера с точками, отдаленными от начала координат на фазовой плоскости, в то время как линеаризация работает вблизи окрестности начала координат. Комбинирование этих методов позволяет эффективно решать задачу управления. По результатам комбинированного метода была обучена нейронная сеть на базисных функциях Персептрона и RBF. Результаты показали, что RBF справляется быстрее с приведением точки в окрестность, в то время как Персептрон имеет большую долю успешных точек, приведенных в окрестность начала координат. Увеличение числа нейронов улучшает время управления для обоих типов сетей, но RBF с максимальным количеством

нейронов демонстрирует наилучшие результаты, при небольшом количестве входных данных.

А.А. Гольдберг, С. А. Климова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПИСАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ СИММЕТРИЧНОГО ВОЛЧКА С УЧЁТОМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

При решении некоторых задач необходимо учитывать обстоятельства, влияющие на траекторию движения волчка, одним из них является магнитное поле Земли. Современная классическая теория описания траектории движения волчка имеет ряд недостатков, которые не позволяют учесть некоторые физические явления, в том числе магнитное поле, что вносит погрешность при сопоставления теоретических моделей и экспериментальных данных и создает проблемы для практического использования расчетов в различных устройствах. Поэтому нами предлагается следующая модель для формирования траектории волчка в декартовой системе координат.

Наша модель в рамках классической теории описывается тремя координатами центра инерции волчка и углами Эйлера (θ , φ , ψ), определяющими ориентацию осей движущейся системы координат относительно неподвижной системы.

Функция Лагранжа для описания механического движения выражается в следующем виде: $E = L = \frac{I_x}{2} \left(\dot{\varphi} \sin^2 \theta + \dot{\theta}^2 \right) + \frac{I_z}{2} \left(\dot{\varphi} \cos \theta + \dot{\psi} \right)^2 - \frac{eH}{2Mc} \left((I_x \sin^2 \theta + I_z \cos^2 \theta) \varphi + I_z \psi \cos \theta \right)$, где I - тензор инерции, для симметричного волчка выполнено $I_y = I_z$.

Дополнительно в модель вводится влияние магнитного поля Земли на магнитный момент ядер, из которых изготовлен волчок, через уравнения Блоха для движения намагниченности.

Путём введения двух времён релаксации в системе уравнений Блоха можно определить поведение статической, направленной по полю H , и динамической, обусловленной переменным полем, компоненты намагниченности.

Такой подход позволяет корректно проводить сравнение результатов расчета траектории движения волчка с данными, полученными экспериментально, используя фиксацию движения в пространстве в реальном времени с помощью высокочастотной камеры и метки, нанесенной на поверхность волчка.

А.С. Кочкин
Алтайский государственный университет
Алтайский государственный технический университет имени Ползунова

ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА НЕЛИНЕЙНОЙ СУПРАТРАНСМИССИИ В БИАТОМНОМ МОДЕЛЬНОМ КРИСТАЛЛЕ СТЕХИОМЕТРИИ АЗВ

Наличие в фононном спектре дискретных структур запрещённой зоны является одним из необходимых условий проявления нелинейной передачи энергии в них. Такой эффект возникает при внешнем гармоническом воздействии. Определяющую роль в таком процессе играют нелинейные локализованные моды.

В данной работе методом молекулярной динамики исследуется эффект нелинейной супратрансмисии в модельном кристалле стехиометрии A_3B со сверхструктурой $L1_2$. Рассматриваются особенности формирования уединенных волн при различных режимах внешнего воздействия. В качестве основных параметров, влияющих на передачу энергии в дискретную среду, является амплитуда и частота воздействия. В рамках модели установлен порог амплитуды для различных частот в запрещенной части спектра. Показано, что для ряда параметров воздействия формируются не уединенные волны, а дискретные бризеры, которые менее интенсивно передают энергию в кристаллическую структуру.

Е.А. Майфот, А.С. Нарсеев, П.В. Захаров
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ Ni-Al И Fe-Al

Активное применение аддитивных технологий в науке и технике привело к лавинообразному росту исследований в этой области, в том числе в порошковой металлургии. Механизмы плавления и спекания наночастиц подверглись пристальному исследованию. Несмотря на это, существует масса фундаментальных вопросов, связанных с влиянием размера таких наночастиц, ролью анизотропии кристаллов и дефектов в них на процессы плавления и спекания.

В работе методом молекулярной динамики исследуются особенности плавления наночастиц двух интерметаллических соединений Ni-Al и Fe-Al с идеальными кристаллическими решетками. Основное внимание уделено размерному фактору наночастиц, выраженному через число координационных сфер.

Ввиду сложности определения температуры плавления наночастиц, предложен подход, позволяющий говорить о средней температуре плавления и оценить другие термодинамические параметры системы в процессе разрушения кристаллических решеток. Показано, что температура плавления существенно зависит от размеров наночастицы, а также конфигурации поверхностей наночастиц. Результаты работы будут полезны при фундаментальных исследованиях процессов спекания металлических наночастиц и разработке технологических процессов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (Договор 075-15-2023-380 от 20.02.2023).

И.В. Бурков, Х.А. Крайни
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ГРАВИТИРУЮЩИХ КОЛЕЦ

Рассматривается система двух гравитирующих колец, центр которых совпадает и находится в центре тяготения. В соответствии с принципом усреднения Гаусса такая система является приближенной моделью двух материальных точек, которые равномерно двигаются по окружностям вокруг одного притягивающего центра.

В вышеописанной системе имеются два положения равновесия. Доказывается, что одно из них устойчивое, а другое – неустойчивое. Доказательство проводится рассмотрением потенциала (потенциал одного кольца выражается через эллиптический интеграл).

Утверждения об устойчивости подтверждаются моделированием в системе Matlab.

Рассмотренная модель позволяет понять, почему планетные системы с круговыми орбитами в одной плоскости наиболее распространены в природе.

У.И. Янковская
Алтайский государственный медицинский университет
Алтайский государственный технический университет имени Ползунова

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В КОМПОЗИТЕ В УСЛОВИЯХ РАСТЯГИВАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ: МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

По имеющимся экспериментальным данным известно, что пространственное расположение углеродных нанотрубок (УНТ) оказывает существенное влияние на прочность и ударную вязкость композитов. Основываясь на имеющихся данных была разработана модель, которая позволила исследовать механические свойства. В этой работе проводится моделирование методом молекулярной динамики для оценки механических свойств композита, армированного УНТ на основе RVE. Пространственное положение и ориентация УНТ представлены на примере однонаправленного армированного элемента композита Ni₃Al, подвергающегося растягивающей нагрузке вдоль направления (001). Для достижения оптимального эффекта от армирования изучается влияние угла наклона УНТ в зависимости от оси механической нагрузки. Были рассмотрены два положения: угол наклона УНТ 0° и 90°. Результаты нашего моделирования показывают, что такие механические свойства как модуль Юнга и предел прочности композита имеют наибольшее значение, когда УНТ ориентирована параллельно направлению оси нагрузки. В работе подчеркивается важность оптимизации пространственного положения и ориентации УНТ для повышения механических свойств композита Ni₃Al.

Р.Д. Аблязов, У.Г. Рыбак, Р.Е. Третьяков, Е.В. Рунёв
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПЕРАТОРЫ ДОНКИНА ПЕРВОГО ПОРЯДКА С КОЭФФИЦИЕНТАМИ В ВИДЕ ЛИНЕЙНЫХ ИЛИ КВАДРАТИЧНЫХ ФОРМ

В математической и теоретической физике важную роль играют гармонические функции, заданные на гладких многообразиях или в областях евклидовых и псевдоевклидовых пространств. Одним из многочисленных свойств гармонических функций является свойство однородности.

В работе были построены дифференциальные операторы первого порядка с коэффициентами в виде линейных и квадратичных форм от координат евклидова пространства. Для указанных операторов построена алгебра Ли, в которой выделена подалгебра Картана, позволяющая построить конечномерные представления алгебры дифференциальных операторов. Различные типы представлений этой алгебры Ли позволяют получить условия разрешимости для поиска новых гармонических функций с заданными показателями однородности. В докладе приведены примеры построения алгебры Ли в размерностях евклидова пространства 2, 3 и 4.

А.Т. Береснева, Д. Борисов, Е.Н. Посохова, Е.В. Рунёв
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГАРМОНИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ С РАЦИОНАЛЬНЫМИ СТЕПЕНЯМИ ОДНОРОДНОСТИ В ЕВКЛИДОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Одними из важнейших объектов математической и теоретической физики являются гармонические функции и гармонические формы. Как правило, они заданы на многомерных евклидовых и псевдоевклидовых пространствах. В силу дополнительных симметрий модели, указанные объекты должны удовлетворять различным условиям, например, условиям однородности.

В работе были исследованы свойства гармонических функций в случае рационального показателя однородности. В качестве примера рассмотрены гармонические функции в двумерном евклидовом пространстве.

Для исследования свойств таких функций используются дифференциальные операторы первого порядка с коэффициентами в виде линейных форм. При этом задача сведена к анализу условий разрешимости систем линейных дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка. В некоторых случаях применима теория аналитических функций комплексной переменной. В докладе приведен пример построения гармонической функции указанным методом.

О.И. Гаенко, О.Б. Кудряшова, С.С. Титов, В.А. Клименко
Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ МОДЕЛЬНОГО ХИМИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ ДИОКСИДА ТИТАНА

Для экстренной очистки воздуха от опасных газовых выбросов может быть использован специально распыленный в воздухе аэрозоль адсорбента. Возможность фотокаталитического окисления в условиях окружающей среды дополнительно повышает эффективность такого способа нейтрализации опасных химических веществ. Известным веществом с фотокаталитическими и адсорбционными свойствами является диоксид титана. При этом, чем выше дисперсность частиц и их удельная поверхность, тем выше ожидаемый эффект.

В работе экспериментально исследованы возможности быстрой очистки воздуха от паров модельного вещества, имитирующего опасное химическое загрязнение воздуха (пары ацетона) с помощью аэрозоля нанопорошка TiO_2 и TiO_2 с добавлением частиц Ag различной морфологии под воздействием УФ-облучения.

Показано, что применение распыленных порошков оксида титана для нейтрализации паров ацетона имеет заметный эффект (до 50 % снижения концентрации), даже без применения ультрафиолета. В этом случае частицы аэрозоля выступают как адсорбенты. Особенно существенный фотокаталитический эффект (при освещении ультрафиолетом) дал аэрозоль $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$ (сферические частицы).

Результаты эксперимента послужат разработке и совершенствованию метода аэрозольной нейтрализации опасных газовых выбросов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-69-00108, <https://rscf.ru/project/22-69-00108/>

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТЕНЦИАЛА МОРЗЕ НА ВОЗМОЖНОСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ БРИЗЕРОВ

В настоящее время есть большое количество работ исследующих дискретные бризеры методом молекулярной динамики. Одним из условий существования этих объектов является запрещенная зона в фононном кристалла. Что, однако не позволяет спрогнозировать как именно будут существовать бризеры. Установление связи между формой потенциала взаимодействия и их поведением позволит попытаться предсказать поведение локализованных мод в кристалле или даже спроектировать кристалл с заданными характеристиками бризера. В качестве потенциала взаимодействия был выбран потенциал Морзе, который с одной стороны достаточно прост в описании и построении, а с другой есть ряд работ по исследованию локализованных мод с помощью данного потенциала, результаты которых в дальнейшем были подтверждены с использованием более качественных моделей.

Целью данной работы является получение зависимостей характеристик бризера (время жизни, частота, амплитуда) от параметров потенциала Морзе.

Исследования проводились методом молекулярной динамики. Для решения поставленной задачи было решено перейти от реальных металлов и сплавов к псевдоматериалам. Для этого путём усреднения параметров металлов были получены абстрактные атомы. Из полученных материалов были сформированы сплавы стехиометрии АЗВ. Параметры потенциала Морзе вычислялись для данных сплавов методом Джирифалько-Вайзера.

Построены графики зависимости времени жизни, частот и амплитуд дискретных бризеров от параметров потенциала Морзе для каждой подрешётки сплава.

А.И. Чердниченко
Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина,
Бийск

ДИСКРЕТНЫЕ БРИЗЕРЫ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ И СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГЦК КРИСТАЛЛОВ

Локальные возбуждения атомной структуры вблизи поверхности кристаллов могут приводить к различным нелинейным эффектам, оказывающим влияние на структурные и энергетические трансформации материала на существенном расстоянии от поверхности. При этом свойства локализованных возбуждений существенно меняются от энергетического рельефа поверхности. В работе нами рассмотрены колебательные моды вблизи поверхности и их характеристики с точки зрения дискретных бризеров.

Цель работы заключалась в выявлении закономерностей существования дискретных бризеров в зависимости от их положения на поверхности кристалла.

Методом молекулярной динамики проводилось исследование высокоамплитудные колебания атомов на поверхности кристаллов различной кривизны. Энергия взаимодействия атомов была описана ЕАМ-потенциалом.

Модели представляли собой кристаллы состава Pt_3Al в виде цилиндров и сфер различного диаметра. Были рассмотрены различные конфигурации локализации дискретных бризеров на поверхностях этих кристаллов.

Результаты компьютерного эксперимента: проанализировано влияние энергетического рельефа поверхности кристаллов на возможность существования устойчивых локализованных возбуждений, получены зависимости частоты колебаний от амплитуды.

Д.В. Бутусов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ИНТЕРПОЛЯЦИИ НА ПРИМЕРЕ ДВУХ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

В работе рассмотрены некоторые методы интерполяции (линейная интерполяция, многочлены Лагранжа, многочлены Ньютона), изучены их математические обоснования, а также проведено сравнение эффективности данных методов при решении задач, позволяющих проанализировать скорость и простоту работы с тем или иным методом, сравнить их погрешности, изучить сравнительные достоинства и недостатки. Сравнение методов проведено на примере их применения для решения механических и физических задач. А именно, рассмотрены задача нахождения зависимости высоты подъема массивных шариков в регуляторе Уатта от величины угловой скорости и задача нахождения зависимости температуры от объема газа, близкого к идеальному (например, гелия) при постоянном давлении (линейная зависимость), при условии, что экспериментатору не известно, что процесс изобарический, а входные данные получены с погрешностью. В обеих задачах исследование зависимости одной физической величины от другой проводится с применением разных методов интерполяции.

СЕКЦИЯ «МЕХАНИКА И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ»

А.Ф. Азова, Н.А. Смирнова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

О ПРИБЛИЖЕННЫХ МЕТОДАХ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКА

Рассмотрены параметрические колебания маятника, вызванные вибрацией точки его подвеса. Построены приближенные границы возбуждения первого параметрического резонанса для линейной модели маятника с демпфированием. Для построения применены метод ван дер Поля и метод стационаризации периодического параметра. Для моделирования наблюдаемого на практике режима установления параметрических колебаний использована нелинейная модель маятника, представляющая собой симбиоз уравнений Матье и Дуффинга. Получена аналитическая оценка амплитуды установившихся параметрических колебаний и проведено сравнение результатов применения методов ван дер Поля и стационаризации периодического параметра. Приведены результаты численного моделирования, подтверждающие состоятельность аналитических оценок.

Д.В. Антуфьев, А.В. Лукин, И.А. Попов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ КОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ВИБРАЦИОННОГО ГИРОСКОПА

Важной задачей при разработке МЭМС гироскопов является увеличение их точности и чувствительности. Одним из способов усовершенствования работы гироскопов является использование эффекта параметрического усиления. В данной работе исследован эффект параметрического усиления в кольцевом гироскопе. Проведен анализ динамики микромеханического вибрационного кольцевого гироскопа, который поддерживается системой торсионов и окружен электродами. Построена математическая модель движения гироскопа для вырожденных эллиптических мод колебаний, связанных эффектом Кориолиса и геометрическими нелинейностями. Рассмотрен случай параметрического усиления, возникающий в результате электростатического возбуждения колебаний, при котором периодическое электростатическое воздействие проявляется в уравнениях движения как внешнее и параметрическое возбуждение. С помощью метода многих масштабов получены уравнения для медленных переменных мод колебаний. Исследовано влияние различных нелинейных эффектов на динамику системы. Исследована зависимость величины параметрического усиления колебаний от различных параметров. Проведен численный бифуркационный анализ системы.

И.С. Барынкин, О.В. Антонова
Санкт-Петербургский политехнический институт Петра Великого

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОВЫХ И МОМЕНТНЫХ РЕАКЦИЙ В ШАРНИРАХ КАРКАСА ЭКЗОСКЕЛЕТА

В докладе рассказывается о методе нахождения силовых и моментных реакций в шарнирах многозвенной конструкции, находящейся в движении. Исходя из особенностей использования конструкции, ее конфигурация, а именно взаимное расположение звеньев в пространстве, постоянно меняется. Это приводит к некоторым трудностям, одной из которых является изменение точки приложения опорной реакции в месте контакта с поверхностью, вплоть до смены места (смена опорных ног). Формулируется и решается обратная задача динамики. Для ее решения используются записи пространственных траекторий отдельных точек, расположенных на теле, полученные при помощи системы захвата движений (VICON). Далее некоторые наборы точек объединяются в сегменты человеческого тела, определяются их Габаритные Массовые Инерционные Характеристики (ГМИХ) на основе роста и веса испытуемого, определяются положения центров масс сегментов и всего тела совокупно. Данные о силовых реакциях, действующих на опорную поверхность, берутся из работ известных исследователей биомеханики. Такой набор исходных данных позволяет определить характер и особенности силовых и моментных реакции в шарнирах каркаса экзоскелета, что поможет при дальнейших исследованиях и расчетах такого рода устройств.

И.В. Баянов, А.В. Шипилов, А.С. Семенов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕССЕТОЧНЫХ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МЕТОДОВ ПРИ АНАЛИЗЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

В работе на отдельных примерах рассматриваются вычислительные методы решения задач механики сплошной среды. Приведены решения ряда задач с применением сеточных и бессеточных методов. Описаны преимущества и недостатки рассматриваемых методов, в частности методов Бубнова-Галеркина, основанного на использовании базисных функций, и метода конечных элементов. Показано, что для некоторых задач механики разрушения бессеточные методы могут быть более эффективными по сравнению с сеточными методами, использующими метод конечных элементов. Отмечается, что для класса задач, решение которых включает в себя быстро меняющийся градиент, разрывы на межэлементной границе или большие деформации могут быть успешно применены бессеточные методы. Сравнительная эффективность применения бессеточных методов с использованием явной схемы решения возрастает при использовании распараллеливания решения задачи при высокопроизводительных вычислениях.

УРАВНЕНИЯ МЕХАНИКИ И ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ В СЛУЧАЕ ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД

В данном исследовании проводится обобщение механической модели электромагнитных процессов на случай подвижных сред. Мы рассматриваем механическую модель, основанную на континууме Коссера и обладающую как трансляционными, так и вращательными степенями свободы. Используя пространственное описание с подвижной точкой наблюдения, мы формулируем дифференциальные уравнения, описывающие поведение данного континуума. Далее мы сводим эти дифференциальные уравнения к виду, удобному для сравнения с уравнениями Максвелла, и вводим механические аналогии электродинамических величин. В случае движущихся сред мы используем механические аналогии вектора электрической индукции, вектора магнитной индукции и плотности электрического заряда, которые ранее были введены для случая неподвижных сред. Помимо этого, мы вводим механические аналогии вектора электрического поля, вектора магнитного поля, вектора плотности электрического тока и вектора плотности электрического напряжения, которые обобщают введенные ранее аналогии для неподвижных сред на случай подвижных сред. Благодаря данным аналогиям в рамках механической модели мы приходим к уравнениям Максвелла для движущихся сред, совпадающими с уравнениями Максвелла для неподвижных сред. Это основной результат нашего исследования.

Исследование проведено при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-11-00363.

Т.С. Елисеева, А.Н. Гордеев, О.В. Антонова

Санкт-Петербургский политехнический институт Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В ОСНОВАНИИ «ЛАСТОЧКИН ХВОСТ» ПЕРА ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Авиационные конструкции проектируются таким образом, чтобы выдерживать большое количество летных циклов, а также повышение нагрузок (режим ЧР). Изучение устойчивости к повреждению ещё на этапе проектирования позволяет рассчитать и спрогнозировать остаточный срок службы детали при возникновении трещины в процессе эксплуатации. Работа посвящена анализу распространения трещины в лопатке компрессора высокого давления при циклическом нагружении. Произведено сравнение влияния формы и размера трещины на скорость разрушения. Решение задачи осуществлено с применением метода конечных элементов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПАР ТРЕНИЯ В СТАЦИОНАРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Камневые опоры – один из классов осесимметричных пар трения – являются распространенными и важными узлами многих измерительных приборов, а также применяются в различных роторных системах (кинетические накопители энергии, газовые центрифуги и пр.). Ввиду высоких скоростей вращения таких устройств и длительного срока их эксплуатации решение износоконтактной задачи на этапе проектирования является важной составляющей обеспечения качества изделий. Широко распространенным соотношением для определения величины износа является закон Арчарда, связывающий количество изношенного материала с контактным давлением и скоростью скольжения контактных поверхностей. В случае осесимметричной формы контактной поверхности и распределения контактного давления, данное соотношение может быть использовано для численного моделирования в стационарной постановке. Кроме того, в данной работе предложены способы вычисления износа на оси вращения, а также учета температурных зависимостей свойств материалов без явного решения связанной термомеханической задачи.

У.П. Карасева¹, А.Б. Фрейдин^{1,2}

¹Институт проблем машиноведения Российской академии наук

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ УЧЁТА НАПРЯЖЕНИЙ В МОДЕЛЯХ НЕРАВНОВЕСНОЙ ВЯЗКОСТИ С ВНУТРЕННИМИ РЕЛАКСИРУЮЩИМИ ПАРАМЕТРАМИ СТРУКТУРЫ

Применение моделей с изменяющимся коэффициентом вязкости представляет собой актуальный способ моделирования поведения материалов. Такие модели позволяют учитывать нелинейность и историческую зависимость свойств материалов от внешних воздействий. В некоторых случаях для описания вязкости материалов используется прямая зависимость вязкости от времени, однако такой подход не отражает полностью реальную физическую картину. Более адекватным является определение вязкости через ее зависимость от напряжений и/или от внутренних релаксирующих параметров структуры. Однако до сих пор не было проведено исследований, учитывающих одновременное воздействие напряжений и внутренних параметров на релаксацию напряжений и вязкость. В связи с этим в работе предлагается и анализируется модель вязкоупругого материала с изменяющимся коэффициентом вязкости с учетом обоих процессов релаксации.

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ СОСУДОВ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Сосуды под давлением, представляющие собой контейнеры для хранения жидкостей или газов под давлением, значительно отличающимся от давления окружающей среды, применяются в различных отраслях, в особенности в таких отраслях как нефтегазовая и химическая промышленность. Производственный контроль за безопасной и эффективной эксплуатацией сосудов и аппаратов под большим давлением и высокой температурой на любом производстве осуществляется благодаря различным ГОСТам и ПНАЭ. Однако использование устаревшей нормативно-правовой документации приводит к совершению ошибок при проектировании, изготовлении и эксплуатации сосудов, в результате чего на производстве могут возникать различные поломки и крушения данного вида оборудования. Вследствие чего возникает необходимость в обновлении и пересчете данных стандартов. Вследствие всего выше сказанного возникает потребность сравнить старые и новые подходы к расчету прочности сосудов и аппаратов под большим давлением и высокой температурой, а точнее сравнить современные ASME и отечественные ГОСТы, проверить их целесообразность при помощи метода конечных элементов, а также выявить в каких ситуациях при транспортировке и переработки нефти и газа на какой нормативный акт лучше опираться.

И.А. Керестень, М.В. Ховайко
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ И МНОГОВАРИАНТНЫЕ ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОВЫХ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКНИСТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Работа посвящена передовым цифровым технологиям в области персонализированного эндопротезирования, не теряющего актуальности на сегодняшний день. Объектом исследования является трехмерная ячейка периодичности композиционной структуры импланта с армирующим волокном из биосовместимого титанового сплава и связующим в виде соединительной ткани. Рассматриваются различные значения объемной концентрации волокон в окрестности, соответствующей наилучшей остеоинтеграции, а также различные типы структуры ячейки периодичности с точки зрения ориентации волокон. Основной задачей работы является многовариантное конечно-элементное моделирование, определение и исследование эффективных коэффициентов линейного температурного расширения и эффективных коэффициентов теплопроводности трехмерной ячейки периодичности. Практическая значимость работы состоит в возможности применения эффективных тепловых свойств для решения широкого спектра тепловых и термонапряженных инженерных задач макроуровня, для которых учет микроструктуры не представляется возможным.

ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ СВЯЗАННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

В докладе обсуждаются вопросы о нахождении наилучших диссипативных параметров двойного линейного осциллятора, обеспечивающих наиболее эффективное затухание его движений. Приводится математическая модель колебаний двойного линейного осциллятора при наличии демпферов вязкого трения и строится аналитическое решение уравнений движения диссипативной системы. В качестве критериев оптимизации принимаются максимизация степени устойчивости системы и минимизация энерго-временного показателя. На основе указанных критериев определяются оптимальные значения диссипативных коэффициентов. При этом для случая энерго-временного критерия результат оптимизации существенно зависит от начальных условий движения, поэтому для получения конкретных оптимальных значений используется сначала принцип гарантированного успеха, а затем допущение о том, что начальные условия равновероятны. Найденные в результате решения задачи оптимальные значения параметров практически не отличаются друг от друга, что позволяет очертить весьма узкий диапазон, в котором наиболее выгодно выбирать их для обеспечения экстремальных свойств всех критериев оптимизации. Полученные решения не только интересны в теоретическом отношении, но и могут найти практическое применение.

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАВАЮЩИХ ТЕЛ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ГРУЗАМИ

В докладе рассматриваются два примера об устойчивости тривиального положения равновесия плавающих тел, обладающих различной геометрией и несущих точечные грузы, в рамках плоской задачи. В первом примере тело имеет форму равнобедренного треугольника и моделирует лодку в море, тогда как во втором примере тело принимается прямоугольным и моделирует понтон или баржу в море. При этом в каждой из задач полагается, что в вершинах тел, которые расположены над ватерлинией, закреплены два одинаковых точечных груза. Для исследования устойчивости используются принципы статического анализа тела, погруженного в жидкость. В каждом примере составляется выражение для потенциальной энергии плавающего тела и находится ее квадратичная аппроксимация вблизи интересующего положения равновесия, которая позволяет выявить условия устойчивости. Полученные результаты приведены в наглядной графической форме в виде границ областей устойчивости на плоскостях двух безразмерных параметров при различных значениях третьего параметра, пропорционального массе грузов. Найденные решения имеют важное теоретическое значение и могут оказаться полезными на практике.

Н.А. Мирошников, А.А. Суханов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

УПРАВЛЕНИЕ ЩЕБНЕУКЛАДЫВАЮЩЕЙ БАРЖЕЙ ЯКОРНЫМИ ТРОСАМИ

Для установки геологоразведочных платформ в море необходимо выровнять площадку на дне, для чего используются щебнеукладывающие баржи, насыпающие ровный слой из щебня. Баржа перемещается в пространстве между якорями за счет изменения натяжений и длин якорных тросов. В результате исследований была составлена модель данной системы, с помощью которой при различных вариантах расположения якорей можно найти область, где существуют решения задачи, а также определить для каждой точки из этой области необходимые длины и натяжения тросов. В результате чего были получены конкретные рекомендации для управления баржей якорными тросами, которые позволят максимально эффективно расставлять якоря для полного покрытия щебнем площадки на дне с минимальным числом перестановок якорей.

И.Р. Муртазин, А.В. Емельянов, А.С. Семенов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВАЛИДАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО НИКЕЛЯ

Исследование посвящено изучению неупругого поведения поликристаллического материала на основе данных о натуральных испытаниях и результатах многоуровневых вычислительных экспериментов. Экспериментальные исследования были проведены на трубчатых образцах из никеля марки НП2 на сложное активное и пассивное нагружение. Неочевидность в описании нелинейного отклика материала при сложном непропорциональном нагружении неизбежно приводит к усложнению имеющихся моделей материалов, поэтому в ходе выполнения работ также была предложена обобщенная микромеханическая модель, характеризуемая биэкспоненциальной зависимостью напряжений от пластических деформаций. По результатам макроиспытаний была проведена валидация ее параметров и представлено сравнение с базовыми подходами. Идентификация параметров проводилась с помощью встроенного функционала среды MATLAB, а также с применением метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе PANTOCRATOR. Преимуществом данного комплекса является возможность применения микромеханического подхода, позволяющего учесть реальные физические процессы на микро- и мезоуровнях.

ОБ ОПЫТЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ПРИВОДА ШАССИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Работа посвящена передовым цифровым технологиям и способам конструирования самолета-амфибии. Объектом исследования является предохранительная пластина, соединяющая композитный фюзеляж самолета с приводом задней стойки шасси. Рассматривается часто используемая схема расположения шасси с задним опорным колесом: 2 передних стойки шасси воспринимают основную нагрузку, а задняя стойка шасси играет вспомогательную роль. Ключевой целью исследования является разработка конструктивного исполнения предохранительной пластины под фиксированную несущую нагрузку в 2.5 кН. В процессе эксплуатации, при открытии стойки шасси под водой, для последующего выхода самолёта-амфибии на берег возможно возникновение ситуации, когда вся основная нагрузка будет восприниматься именно задней стойкой шасси в состоянии частичного открытия. При отсутствии предохранительной пластины это может привести к нарушению целостности композитного силового каркаса фюзеляжа. Рассматриваются различные материалы, а именно: алюминиевый сплав АМг6, сталь марки 30ХГТ, титановый сплав ВТ6. Также рассматриваются различные толщины пластины из стандартной номенклатуры заготовок: 1, 2 и 3 мм. Основной задачей является определение геометрической топологии предохранительной пластины, обеспечивающей контролируемое разрушение согласно достижению предела текучести материала или потере устойчивости конструкции.

Д.М. Пашковский, Е.А. Иванова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПИСАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ КОНТИНУМА КОССЕРА

При разработке электротехнических систем: электромоторов, генераторов или трансформаторов, требуется рассчитывать электромагнитные поля. Однако, существуют сложности при использовании классических уравнений Максвелла для описания постоянных магнитов, а также процесса их намагничивания. Для решения данной проблемы была применена модифицированная система уравнений Максвелла, основанная на модели механики сплошной среды с дополнительными вращательными степенями свободы. На основе модифицированной системы уравнений Максвелла получено решение задачи магнитостатики для катушки с сердечником. Построено аналитическое решение для тензора электромагнитной индукции на основе закона Гаусса для вектора магнитного заряда и тензорной декомпозиции Гельмгольца. А также получено аналитическое решение модифицированной системы уравнений Максвелла для магнитной индукции с учетом определяющего соотношения для эквивалентного тока и решения для катушки-соленоида. Качественно описан эффект усиления поля при добавлении в катушку сердечника. Показано влияние различных форм тензора электромагнитной индукции и вектора магнитного заряда на структуру получаемого аналитического решения.

Е.А. Садовченко, Е.Ю. Витохин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ВОДОСБРОСА ПРИ ДЕЙСТВИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ОПИСАНИЯ

В современном мире гидротехнические сооружения играют важную роль. Данные объекты служат не только для защиты городов от затоплений прилегающих к побережью территорий, но и способствуют выработке электроэнергии, преобразуя энергию напора жидкости. Для избежания техногенных аварий и катастроф, необходимо контролировать эксплуатационное состояние. Одним из способов контроля является создание математических и конечно-элементных моделей, которые позволят оценить максимальные нагрузки на основе водосброса, спрогнозировать будущие состояния модели и протестировать различные режимы работы. Целью настоящей работы является определение и анализ напряженного-деформированного состояния водосброса Ита, находящегося на реке Уругвай в Бразилии, при действии гидродинамической нагрузки и сил гравитации. Для оценки данных параметров построено две различных модели. Моделирование проводилось с помощью нестандартного подхода с использованием пространственного описания в программном комплексе Abaqus методом конечных элементов. Связанный Эйлерово-Лагранжевый анализ позволяет не только наглядно увидеть распространение жидкости по телу водосброса, но и оценить прочность конструкции. Водосброс представляет Лагранжеву область, такая сетка привязана к материальным точкам и при деформации объекта, деформируется вместе с ним. Жидкость будет иметь Эйлерову сетку, которая остается неизменной, поскольку материал деформируется внутри заранее выделенной области, узлы которой зафиксированы в пространстве. В ходе работы была построена модель водосброса Ита, получены и проанализированы такие результаты, как: поля перемещений и напряжений водосброса, поля скоростей жидкости. Особый интерес представляют возникающие растягивающие напряжения, поскольку прочность бетона на растяжение меньше, чем на сжатие.

Р.В. Федоренко, А.В. Лукин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА УПРОЩЕННОЙ ЧИСЛЕННОЙ ПРОЦЕДУРЫ АНАЛИЗА ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТИ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИ НАГРУЖАЕМОГО СОСУДА ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Проектирование современных «горячих» реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем является одним из наиболее актуальным направлением отечественной энергетики последних лет. Конструктивные особенности и основные режимы работы подобных реакторов вызывают необходимость обоснования прочности в условиях неупругого деформирования. Современная нормативная база не обладает достаточной полнотой критериев и методов оценок элементов конструкций объектов использования атомной энергии при учете пластических деформаций. В данной работе приводятся результаты разработки упрощенной численной процедуры, позволяющей получать классические диаграммы приспособляемости термоциклически нагруженного сосуда под давлением, с использованием методов численного интегрирования нелинейной краевой задачи математической физики. Применение данной процедуры, в отличие от классической аналитической задачи приспособляемости, позволяет учитывать нелинейные диаграммы

деформирования и сложные комбинации нагружения. В качестве верификации процедуры проводится сравнение с классической задачей.

П.Я. Стронгин¹, П.С. Степанов², Л.М. Яковис¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД РОБАСТНОЙ НАСТРОЙКИ ТИПОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ МНОГОСВЯЗНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Рассматривается метод настройки параметров типовых регуляторов, обеспечивающий работоспособность систем управления многомерными динамическими объектами в условиях неполной информации об их математических моделях. Элементами передаточной матрицы объекта управления являются устойчивые дробно-рациональные функции с запаздыванием, коэффициенты которых известны с точностью до интервалов возможных значений. Передаточная матрица многомерного регулятора представляет собой линейную комбинацию пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих. Предлагаемая процедура настройки предусматривает две стадии. На первой – применительно к статическому объекту, соответствующему передаточной матрице исходного динамического объекта, одним из предложенных в работе способов формируется интегральный многомерный регулятор, гарантирующий замкнутой системе управления максимальный запас сверхустойчивости. На второй стадии путем решения задачи поисковой оптимизации малой размерности находятся настройки многомерного типового регулятора, гарантирующего устойчивость и наилучшее гарантированное качество управления для системы с исходным динамическим объектом.

М.М. Фролов, А.В. Савиковский, А.С. Семенов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КРИТЕРИЕВ РОСТА НА РАСЧЕТНУЮ ТРАЕКТОРИЮ ТРЕЩИНЫ ПРИ ХРУПКОМ РАЗРУШЕНИИ

Рассматривается моделирование процесса распространения трещины при хрупком и квазихрупком разрушении с помощью метода конечных элементов. Расчеты проводились для изотропных материалов. Сравниваются различные критерии выбора направления роста трещины и анализируется их влияние на конечную траекторию трещины. Автоматизированное моделирование распространения трещины реализовано с помощью написанного макроса на языке ANSYS APDL. Возможности макроса позволяют моделировать распространение трещины при монотонном хрупком разрушении, многоциклового усталости для произвольно выбранного упругого изотропного материала. Алгоритм позволяет реализовать любой требуемый критерий выбора направления распространения трещины и закон усталостного роста. Результаты моделирования распространения трещины сравниваются с экспериментальными данными для различных геометрий.

Д.А. Чернуха, А.В. Шипилов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КЛАССИЧЕСКИХ ТЕОРИЙ ПРОЧНОСТИ И КОНЦЕПЦИИ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ПРОЧНОСТИ НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА ТРУБОПРОВОДА

В современной инженерной практике для оценки надёжности применяются различные теории прочности, позволяющие оценить поведение материалов и конструктивных элементов под воздействием внешних нагрузок. Однако, большинство из них не учитывают в полной мере временной фактор, например, при долговременном нагружении или при воздействии условий окружающей среды на конструктивные элементы, влияющие на долговечность и надёжность объекта. Это особенно актуально для объектов, работающих в условиях длительной эксплуатации. В данном случае необходимо прогнозировать срок службы и корректировать планы по техническому обслуживанию и ремонту для оптимизации эксплуатационных затрат. Таким образом, разработка и применение теорий прочности, учитывающих долговременные нагрузки и условия эксплуатации, является важной задачей с точки зрения обеспечения надёжности и безопасности технических объектов. В данном исследовании представлен расчет элемента трубопровода с использованием конечно-элементного моделирования с учетом теории долговременной прочности. Выбор трубопровода в качестве объекта исследования обусловлен его широким применением в качестве составной части различных инженерных систем.

Ф.В. Шаделко, Р.В. Федоренко, В.С. Модестов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОДБОР ДЕМПФИРУЮЩЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ АМОРТИЗИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ КОНТЕЙНЕРОВ С ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

В процессе эксплуатации атомных станций возникает потребность в безопасном хранении, транспортировке и утилизации отработанного ядерного топлива. Для этого используются специальные защитные контейнеры. При транспортировке возможны аварийные ситуации, такие как падение контейнера, что может привести к серьезным последствиям, включая остановку работы станции. Для предотвращения разрушения контейнеров применяются амортизирующие устройства, которые заполнены специальной демпфирующей средой. В данной работе представлены результаты исследования направленного на подбор оптимального наполнителя для таких устройств, обеспечивающего целостность контейнеров с отработанным ядерным топливом. Анализ выполнен методом конечных-элементов с использованием программного комплекса SIMULIA Abaqus.

О ТОЧНОСТИ КОРОТКОВОЛНОВЫХ И ДЛИННОВОЛНОВЫХ АСИМПТОТИК ДЛЯ ТЕРМОУПРУГИХ ВОЛН В ОДНОРОДНОМ ИЗОТРОПНОМ СЛОЕ

Работа современных приборов радио- и телекоммуникаций опирается на процесс генерации поверхностных и объемных упругих волн в тонких пластинах. В частности, одним из перспективных способов возбуждения колебаний в слое является применение лазерного теплового импульса. Из этого следует, что при формулировании математической модели необходимо разрешать связанную задачу термоупругости. Исторически, данная аналитически непростая задача разрешалась с применением ряда математических допущений, что приводило лишь к приближенному решению. Целью данной работы является проверка точности асимптотических приближений путем сравнения результатов с точным решением, полученным при помощи применения современных технологий символьного программирования и теории продолжения решения нелинейных уравнений. В результате работы были получены дисперсионные кривые симметричных и антисимметричных объемных волн в тонких пластинах. Также были найдены поля перемещений нескольких первых форм волновых движений.

СЕКЦИЯ «ГИДРОАЭРОДИНАМИКА, ГОРЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН»

Д.Э. Агеев, М.А. Засимова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНОЙ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА ОКОЛО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОРЕБРЕННОЙ ТРУБЫ И ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ

В работе проводится численное исследование течения и теплообмена при свободной конвекции вблизи одиночной оребренной трубы и однорядного пучка оребренных труб. Пучки оребренных труб применяются в качестве теплопередающих поверхностей в аппаратах воздушного охлаждения (АВО), широко распространенных в энергетике, системах воздушного отопления и других отраслях. Расчеты выполнены с помощью программного пакета ANSYS Fluent. Численно решалась система уравнений Навье-Стокса и энергии для ламинарного течения воздуха с термодинамическими и теплофизическими свойствами, зависящими от температуры. Результаты сопоставлены с имеющимися в литературе экспериментальными данными. Исследовано влияние сеточной зависимости решения. Для задачи о течении и теплообмене вблизи одиночной трубы изучалось влияние расстояния от трубы до боковой границы на решение. Проведено параметрическое исследование расстояния между ребрами и формы ребра, нацеленное на повышение интенсивности и эффективности теплообмена.

В.Р. Адиатуллин, Е.М. Смирнов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РЕАЛИЗАЦИЯ В КОДЕ SINF/FLAG-S МОДЕЛИ ПОДСЕТОЧНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ WALE И КРОСС-ПЛАТФОРМЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ПО МЕТОДУ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ

SINF/Flag-S – конечно-объемный неструктурированный *CFD*-код, разрабатываемый на кафедре “Гидроаэродинамика, горение и теплообмен” Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Для моделирования турбулентности в кафедральном коде уже реализован набор полуэмпирических *RANS* моделей турбулентности, включая одну из наиболее популярных на сегодня модель *k- ω SST*. Также в коде *SINF/Flag-S* реализованы *LES* модель Смагоринского и несколько гибридных *RANS/LES* моделей.

В рамках данной работы в кафедральный код была внедрена «подсеточная» модель турбулентности *WALE* для *LES* подхода. В работе дается обзор результатов кроссплатформенной верификации (с использованием коммерческого пакета *ANSYS Fluent*) реализованной «подсеточной» модели на ряде внутренних и пространственно-периодических турбулентных течений.

В.Р. Адиатуллин, В.В. Рис
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ КАНАЛА ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ С ВНУТРЕННИМ ДВУСТОРОННИМ НАКЛОННЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

В работе представлены результаты численного моделирования турбулентного течения и теплообмена на начальном участке каналов прямоугольного и квадратного сечений с двусторонним внутренним наклонным оребрением. Ребра наклонены относительно продольной оси канала на 45° . Течение и теплообмен моделируются при значениях числа Рейнольдса $Re = 2 \times 10^5$ и числа Прандтля $Pr = 0.7$. В качестве рабочей среды рассмотрен воздух с постоянными теплофизическими свойствами. Расчеты проводились в программном комплексе *ANSYS Fluent* с применением *k- ω SST* модели турбулентности. Результаты решения сопоставлены с опубликованными данными эксперимента, а также с решением, полученным в симметричной и периодической постановке (с учётом симметричности геометрии и развитости процессов течения и теплообмена) на участке канала длиной, равной шагу установки рёбер.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-29-00094.

М.В. Акунец, А.В. Гарбарук
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДИФИКАЦИЯ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ОБТЕКАНИЯ КРЫЛОВЫХ ПРОФИЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБРАТНОГО МЕТОДА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Известной проблемой при использовании метода RANS является низкая точность расчета тех или иных классов течений, вызванная несовершенством существующих полуэмпирических моделей турбулентности. В частности, при расчете обтекания крыловых профилей точность предсказания аэродинамических характеристик резко снижается при повышении угла атаки до критических значений, при которых возникает отрыв от поверхности. Эта проблема может быть решена путем модификации используемой модели турбулентности. Для решения этой задачи недавно была предложена новая методика, основанная на сочетании обратного метода и машинного обучения (*Field Inversion and Machine Learning – FIML*).

Настоящая работа посвящена применению FIML для модификации модели турбулентности с целью повышения точности расчета крыловых профилей при околокритических углах атаки. Предлагаемая модификация основана на умножении диссипативного слагаемого в уравнении переноса турбулентных характеристик на поправочную функцию, для определения формы которой используются методы машинного обучения. Обучающей базой для этих методов выступает совокупность оптимальных значений поправочной функции, рассчитанных при помощи обратного метода и обеспечивающих совпадение расчетного и экспериментального коэффициента подъемной силы при одном из режимов обтекания.

Полученная в итоге модификация модели турбулентности обеспечивает повышение точности предсказания положения отрыва при околокритических углах атаки и, как следствие, коэффициента подъемной силы при этих режимах.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ СХЕМ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

Сложные задачи, включающие ударно-волновое взаимодействие, встречаются во многих практических приложениях аэрогазодинамики и аэроакустики. На сегодняшний день актуальным вопросом остается возможность аккуратного численного моделирования такого класса течения, что связано с ограниченными возможностями численных методов, т.к. последние часто обладают высоким уровнем диссипации или приводят к возникновению интенсивных численных осцилляций за фронтом ударной волны.

В настоящей работе рассчитаны нестационарные течения, включающие сложные системы ударных волн, взаимодействующих как между собой, так и со сдвиговыми слоями и вихрями. Численные расчеты выполнены при помощи конечно-объемного «неструктурированного» программного кода SINF/Flag-S, разрабатываемого в СПбПУ. В рамках данной работы код SINF/Flag-S был дополнен возможностью проведения расчетов с применением схем, обеспечивающих высокую точность на гладких участках решения и корректное разрешение разрывов. Показано влияние точности метода на разрешение вихревых структур, развитие неустойчивости потока в целом и контактных разрывов в частности.

В.А. Баранов, А.Г. Абрамов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЛУБОКИМИ СВЕРТОЧНЫМИ НЕЙРОСЕТЯМИ ДВУМЕРНЫХ ПОЛЕЙ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ ОБТЕКАНИЯ КРЫЛОВОГО ПРОФИЛЯ

Работа посвящена изучению возможностей применения искусственных нейронных сетей к предсказанию характеристик аэродинамических течений на примере задачи о стационарном ламинарном обтекании симметричного крылового профиля NASA0012. В целях формирования наборов данных, пригодных для обучения нейросетей, с помощью CFD-пакета Ansys Fluent были проведены массовые параметрические расчеты при разных углах атаки в диапазоне от -25 до 25 градусов (всего 5001 расчет) при числе Рейнольдса 200 с задействованием разработанных скриптов автоматизации. Созданные датасеты включали двумерные поля скорости и давления, а также значения подъемной силы и сопротивления. Методика предсказания картин полей базировалась на модифицированной архитектуре глубокой сверточной нейросети U-Net с общим количеством слоев 54 и более 94 миллионами весов. Обученная модель нейросети применялась для предсказания аэродинамических характеристик. Оценка качества прогнозирования производилась на основе широко используемых на практике метрик MSE и MAPE. Сделан общий вывод о приемлемом качестве работы моделей в ограниченных диапазонах изменения угла атаки. Полученные результаты, методики и программные наработки задействуются в дальнейших исследованиях по тематике применения различных методов машинного обучения к задачам гидродинамики и теплообмена с акцентом на существенное снижение вычислительных затрат по сравнению с численным моделированием.

И.А Громов¹, Д.О. Кулешов², А.А. Дьяченко², С.В. Булович³, А.А. Васильев³
¹Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН
²Институт аналитического приборостроения РАН
³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОКАПЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОРАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НОВОГО ТИПА И ПОДДЕРЖИВАЮЩИЕ РАСЧЕТЫ

Современные микрокапельные электрораспылительные системы не отвечают требованиям проведения микрокапельного синтеза по нескольким причинам: медленная скорость потока распыляемого раствора во всех системах и работа с каплями малых диаметров (менее 10 мкм), снижающих возможности управления их характеристиками. Целью данной работы является разработка, изготовление и экспериментальное тестирование новой мультикапиллярной электрораспылительной системы. Предложенное решение позволяет обойти недостатки существующих систем для генерации заряженных микрокапель и дает возможность реализовать микрокапельные химические реакции на практическом уровне.

Электрораспыление в данной системе реализуется при подаче газа и распыляемого раствора вместе с приложенными потенциалами к транспортному и распыляющему электродам.

Экспериментальные исследования сопровождаются газодинамическими расчетами истечения струи из кольцевого капилляра. Моделирование течения проводится с помощью программного пакета ANSYS Fluent 2021R1.

В.Д. Голубков, А.В. Гарбарук
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА КАК ТЕСТОВАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ АПРОБАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ГЛОБАЛЬНОГО АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ

Стационарные решения, полученные в результате численного моделирования, могут быть неустойчивыми и, следовательно, нереализуемыми на практике. Исследование устойчивости течения может быть проведено с использованием численного решения нестационарных уравнений, однако реализация такой задачи может потребовать значительных вычислительных ресурсов. Менее затратной альтернативой является проведение Глобального Анализа Устойчивости (ГАУ). Одним из элементов ГАУ является расчет матрицы якобиана правой части уравнений Навье-Стокса, для чего существует несколько различных подходов. Настоящая работа посвящена применению технологии автоматического дифференцирования для решения этой задачи.

Реализация ГАУ с использованием технологии автоматического дифференцирования была верифицирована путем сравнения с результатами численного решения нестационарных двумерных уравнений Навье-Стокса на примере обтекания круглого цилиндра при околоскритических числах Рейнольдса. Глобальный Анализ Устойчивости предсказывает наиболее быстрорастущие возмущения в виде вихревой дорожки (дорожки Кармана) в следе за цилиндром. Пространственные распределения этих возмущений и показатель их роста во времени с высокой точностью совпадают с результатами численного решения

нестационарных уравнений Навье-Стокса, при этом вычислительные ресурсы, требуемые для проведения ГАУ, значительно меньше.

А.Д. Градусов, Е.М. Смирнов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ ПРИ СМЕШЕНИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА В КАНАЛЕ С УЗКОЙ СТРУЕЙ, СОНАПРАВЛЕННО ВДУВАЕМОЙ У ДНА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ КАВЕРНЫ

В работе представлены результаты численного моделирования развитого турбулентного течения в плоском канале с узкой струей, сонаправленно вдуваемой у дна прямоугольной каверны. Течение моделируется при значениях чисел Рейнольдса $Re=10^5$ и различных отношениях массового расхода. Расчеты проводились в программном комплексе *ANSYS CFX* с применением *k- ω SST* модели турбулентности. Анализировалась структура течения в области смешения потоков, а также влияние геометрических параметров каверны на потери давления.

И.О. Демо^{1,2}, В.В. Калаев²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²ООО «Софт-Импакт»

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛОМАСООБМЕНА ПРИ РАСТВОР- РАСПЛАВНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ SiC

Рост из раствора с расположением затравки сверху (Top seed solution growth) – распространенная техника для производства высококачественных кристаллов SiC. Процесс выращивания значительно зависит от распределения температуры, течения и концентрации углерода в растворе. В работе проведено численное моделирование процесса раствор-расплавной кристаллизации SiC. Отмечено большое влияние силы Лоренца на турбулизацию течения в растворе. Для верификации расчета максимальная скорость растворения тигля и роста паразитного кристалла были сопоставлены со статьей “Dang. Y. Adaptive process control for crystal growth using machine learning for high-speed prediction: application to SiC solution growth”. В рамках параметрического исследования было изучено влияние повышения температуры раствора: изменение скорости вращения стержня, держащего затравку.

Т.А. Заворохин, Э.Р. Зайнуллина, В.И. Романова, В.Ю. Митяков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЫ

Работа посвящена измерению теплового потока при конденсации насыщенного водяного пара на поверхности горизонтальной трубы. Измерительный участок собран по схеме труба в трубе: внутренняя труба выполнена из нержавеющей стали, кожух – из оптически прозрачного стекла. В исследовании совмещены градиентная теплотометрия,

термометрия и наблюдение за ходом конденсации. Плотность теплового потока определена двумя способами: по уравнению стационарной теплопроводности по показаниям термопар, установленных на внутренней и наружной поверхности трубы и в ходе прямых измерений по показаниям градиентных датчиков теплового потока из монокристаллического висмута. Первичные преобразователи установлены в трёх сечениях по длине трубы: термопары монтированы диаметрально противоположно местам установки датчиков. Измерения выполнены при расходе насыщенного водяного пара 2,8 г/с, варьировании расхода охлаждающей воды в диапазоне от 100 до 250 г/с и повороте горизонтальной трубы вокруг собственной оси в диапазоне от 0 до 180°. В результате экспериментов построены зависимости местной плотности теплового потока от времени (временные теплограммы) и от угла поворота трубы (угловые теплограммы). Сопоставление измеренных значений с картинами течения конденсата позволили обосновать пульсации плотности теплового потока и подтвердить расположение области скопления конденсата.

И.А. Игнатъев, С.А. Галаев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ОРЕБРЕННОМ КАНАЛЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТКИ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

Воздушно-конвективная система охлаждения лопаток газовых турбин включает в себя петлевые каналы, расположенные внутри лопаток. Для интенсификации теплообмена в данных каналах устанавливаются ребра, расположенные периодически под углом к направлению потока в канале. В работе проводится численное моделирование турбулентного течения и теплообмена в оребренном канале квадратного сечения ($D \times D$) с двумя поворотами на 180°, в котором ребра квадратного сечения расположены периодически на двух противоположных стенках и установлены под углом 60°. Высота ребер и расстояние между ними заданы в соответствии с опубликованными экспериментальными данными. Для рабочей среды с числом Прандтля $Pr = 2.5$ приняты условия постоянства плотности и остальных теплофизических свойств. Течение характеризуется числом Рейнольдса $Re = 6 \cdot 10^4$. Расчеты выполнены в пакете ANSYS Fluent 19.3, моделирование турбулентности проводилось с помощью $k-\omega$ SST модели. Результаты расчетов по падению давления в канале и локальному теплообмену сопоставлены с экспериментальными данными. С целью совершенствования конструкции с точки зрения интенсификации теплоотдачи рассмотрен вариант канала, в котором геометрические характеристики оребрения выбраны в соответствии оптимальными для прямолинейного канала значениями.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-29-00094.

Н.Е. Кикоть, П.Г. Бобылев, А.В. Павлов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ НА ТРУБЧАТОМ НАГРЕВАТЕЛЕ МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ

В настоящее время оценивается только средняя плотность теплового потока при кипении на горизонтальных трубах. Такой подход не позволяет оценить распределение плотности теплового потока. Неравномерность тепловыделений способствует быстрому

износу теплообменного оборудования. В работе измерена местная плотность теплового потока при пузырьковом режиме кипения насыщенной воды на трубчатом нагревателе. Градиентная теплотометрия позволила выявить неравномерность тепловыделений при кипении насыщенной воды в диапазоне плотности теплового потока от 45 до 100 кВт/м². Получены сравнения значений плотности теплового потока с классическими расчётными моделями. Построены круговые тепло- и термограммы. Выявлена значительная неравномерность местной плотности теплового потока по углу поворота, что связано с разными условиями отвода пара от поверхности, при этом термометрия неравномерность не выявила. Градиентная теплотометрия продемонстрировала себя как надежный и информативный метод исследования пузырькового режима кипения.

С.А. Князев¹, М.Д. Селезнева¹, А.А. Ключ², Е.А. Осюк³, В.В. Сероштанов¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова

³Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ОДИНОЧНОЙ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНОЙ ЛУНКЕ НА ПЛАСТИНЕ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ НАКЛОНА ЛУНКИ К НАБЕГАЮЩЕМУ ПОТОКУ

Энергоэффективные поверхности теплообмена представляют собой поверхности с дискретными элементами шероховатости и предназначены для организации течений со сложной трехмерной структурой. Перспективной в этом ключе стала овално-траншейная лунка (ОТЛ), представляющая собой канавку с полусферическими окончаниями, внутри которой генерируются моносмерчевые структуры. Теплогидравлическая эффективность таких лунок достигает значения 1,34 против 0,93 для сферических аналогов той же глубины.

В работе экспериментально и численно исследована интенсификация теплообмена при обтекании одиночной обогреваемой ОТЛ глубиной 0,25 и удлинением $L = 5$ (размеры отнесены к ширине ОТЛ), установленной на пластине. Угол наклона лунки θ к набегающему потоку варьировался в пределах от 0 (продольное обтекание) до 90° (поперечное обтекание). Для измерения плотности теплового потока на поверхности ОТЛ использованы градиентные датчики теплового потока. Численное моделирование выполнено путем решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) с использованием SST-модели Ментера и многоблочных вычислительных технологий, реализованных в пакете VP2/3.

Показано наличие смерчевой структуры в ОТЛ при ее наклоне к набегающему потоку на угол $\theta = 30...75^\circ$. Данные по распределению коэффициента теплоотдачи, полученные в эксперименте, согласуются с численными прогнозами. Кроме того, выявлено, что диапазон углов θ , где наблюдается максимальная интенсификация теплообмена совпадает соотвествует максимальным перепадам коэффициента трения и статического давления.

В.Ю. Коекин, С.В. Булович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ГАЗОДИНАМИКА ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА РОТОРНО-ЛОПАСТНОЙ МАШИНЫ

В работе рассматривается роторно-лопастной двигатель с внешним подводом тепла. Упрощенная постановка задачи включает в себя однотипный по ширине элемент двигателя,

на долю которого приходится одна трубка теплообменного аппарата в виде U-образного канала с круглым сечением. Теплообменник контактирует с камерами двигателя через входной и выходной коллектор.

Сформулирована математическая модель нестационарного турбулентного течения газа в теплообменном аппарате роторно-лопастной машины. Численное моделирование проводится в 2.5D постановке в пакете ANSYS Fluent. В камерах двигателя строится квазитрехмерная расчетная сетка. В трубке теплообменника и примыкающих к ней коллекторах используется трехмерная расчетная сетка. В модели пренебрегается влиянием «торцевых» границ двигателя и коллекторов, они имеют условие плоскости симметрии. На остальных границах, связанных с ограниченными поверхностями в виде твердых стенок, ставится условие прилипания и адиабатичности.

Исследованы акустические колебания газа, вызванные нестационарностью массообмена между теплообменником и камерами двигателя. Рассмотрено влияние основных геометрических размеров на гидравлическое сопротивление теплового аппарата.

Ю.М. Коляян, Д.К. Зайцев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА VOF ДЛЯ РАСЧЕТА РАССЛОЕННОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

В настоящее время на газовых месторождениях возникают вопросы о выносе жидкости из протяжённых горизонтальных и наклонных стволов. Метод VOF широко используется для моделирования течений жидкости со свободной поверхностью, однако его применимость для расчета расслоенного газожидкостного течения в канале изучена недостаточно хорошо. В докладе приводятся результаты предварительного тестирования метода VOF на модельной задаче плоского установившегося расслоенного течения в наклонном канале при наличии градиента давления. Задача решается в периодической постановке в пакете ANSYS Fluent с использованием модели турбулентности $k-\omega$ SST. Все расчеты проводятся на низкорейнольдсовой сетке, обеспечивающей $y^+ < 1$. Помимо VOF-моделирования выполняются расчеты по двузонной модели с выделением межфазной границы, на которой обеспечивается равенство касательных напряжений со стороны газа и жидкости. Результаты расчетов сравниваются с данными эксперимента. Показано, что для рассмотренной задачи использование классического VOF-подхода дает некорректные результаты, в частности наблюдается существенное занижение расхода газа. Для решения этой проблемы использовалась поправка Егорова, обеспечивающая подавление турбулентной вязкости на границе раздела фаз. В ходе методических расчетов обнаружено, что поправка Егорова чувствительна к расчетной сетке и к величине управляющего параметра. При правильной настройке поправка Егорова обеспечила удовлетворительное совпадение с опорными данными. Расчеты по двузонной модели дают достаточно хорошее согласование с данными измерений, что позволит использовать такой подход как эталонный для дальнейшего тестирования метода VOF при других значениях режимных параметров.

Т.С. Корскова, М.А. Засимова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ ВБЛИЗИ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ НАКЛОНА ЕГО ОСИ

Рассматривается течение воздушной среды, формирующееся вблизи нагретого цилиндра с различной пространственной ориентацией (от горизонтальной до вертикальной). Значение перепада температуры между цилиндром и окружающей средой варьируется в диапазоне 15...200 К, что соответствует значениям числа Релея $(2...30) \times 10^4$. Рассмотрен свободноконвективный режим течения, когда под действием сил плавучести формируется подъемное течение воздуха и над поверхностью цилиндра образуется тепловой факел. Численно решается система уравнений Навье-Стокса и энергии, расчеты выполнены в 2D и 3D постановках. Для построения расчетных сеток использовался пакет ICEM CFD, моделирование течения осуществлялось в CFD коде ANSYS Fluent. Сопоставлены результаты расчетов, проведенных с использованием приближения Буссинеска и на основе модели идеального газа. Представлено сопоставление рассчитанных осредненных по поверхности цилиндра и локальных (вдоль окружного направления) значений числа Нуссельта с литературными данными.

А.П. Корчагин, А. Мамчиц, С.Е. Шувалов, А.А. Макеев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАКОНЦОВОК ЛОПАСТИ ВОЗДУШНОГО ВИНТА НА ПАРАМЕТРЫ ТЯГИ И АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С широким распространением беспилотных летательных аппаратов возрастают требования к техническим характеристикам изделий данного типа, а соответственно и к их отдельным компонентам. Обретает значимость такая характеристика, как заметность изделия. Применительно к воздушным винтам основными показателями становятся не только КПД и тяга, но и уровень издаваемого шума. Изменяя геометрические параметры воздушного винта можно добиться сбалансированных технических характеристик.

В данной работе представлен сравнительный анализ различных видов законцовок лопастей воздушного винта. С помощью RANS-моделирования процесса вращения воздушного винта в нестационарной постановке получены и проанализированы данные по тяге, а также оценено акустическое давление (и соответствующий ему шум) в окружающем пространстве интегральным методом Фокса Вильямса – Хокинга.

Д.Ю. Кучиев, А.А. Смирновский
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ РАСПЛАВА СТЕКЛА В ЭЛЕКТРОПЕЧИ ПРЯМОГО НАГРЕВА

Представляются результаты численного моделирования естественной конвекции расплава жидкого стекла в упрощённой конструкции тигля электропечи прямого нагрева.

Исследуются характеристики течения при разных числах Грасгофа с учётом переменности свойств среды (вязкости, электрической проводимости, теплопроводности и др.). Основной целью работы является верификация численного решения модельной двумерной сопряженной задачи гидродинамики, теплофизики и электричества путём сопоставления решений, полученных с помощью двух программных пакетов: OpenFOAM и COMSOL. Для решения данной задачи в OpenFOAM создан собственный решатель, учитывающий течение и теплообмен с учётом эффектов плавучести в поле силы тяжести, переменность свойств среды, джоулев нагрев при протекании электрического тока в среде в случае наличия внешнего электростатического поля. Для обоих программных пакетов проводится исследование сеточной сходимости, а также качественное и количественное сравнение полей скорости и температуры.

Л.Л. Лушникова, С.А. Галаев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ОРЕБРЕННОЙ СТЕНКОЙ

Повышение эффективности теплообменных аппаратов может быть достигнуто за счет увеличения теплоотдачи между стенками устройства и омывающей их жидкости. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования установившегося течения и теплообмена несжимаемой жидкости с постоянными теплофизическими свойствами в плоском канале, на одной из стенок которого с равными шагами размещены ребра прямоугольного сечения. Рассматривались два режима с числами Рейнольдса равными 13100 и 37200. Моделирование проводилось в 2D постановке с использованием программного пакета ANSYS Fluent v2021. Целью работы являлось изучение особенностей течения и теплообмена в канале с оребренной стенкой, а также оценка применимости различных моделей турбулентности к этому классу задач. На основе опубликованных в 1990 Дж.Ф. Локкеттом и М.У. Коллинзом результатов опыта проведена валидация численных результатов, полученных с применением нескольких моделей турбулентности. Для всех расчетов характерно образование трех зон рециркуляции, размер которых предсказывается моделями по-разному. Показано, что существует оптимальный с точки зрения интенсификации теплообмена шаг оребрения.

П.В. Любимов
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

СПОСОБ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ПОЛОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО УЧАСТКА ГАЗОПРОВОДА С ЛОКАЛЬНЫМ СКВОЗНЫМ ДЕФЕКТОМ

Исследование проводится в области герметизации полости горизонтальных труб газопроводов для защиты их внутренней поверхности от воздействия атмосферы и устранения потерь среды, движущейся во внутритрубном пространстве. Использование предлагаемого временного герметизирующего устройства (ВГУ) может использоваться для восстановления механической прочности участков труб в газовой, нефтяной и других областях промышленности без прекращения их эксплуатации. Способ основан на использовании цилиндрической втулки меньшего диаметра по отношению к диаметру

газопровода, которая помещается в горизонтальный участок газопровода, где под действием рабочего давления, на участке установки втулки газопровода, втулка газопровода остается неподвижной за счет сил трения, возникающих в плоскости контакта наружной поверхности цилиндрической втулки и внутренней поверхности участка газопровода. При возникновении сквозного дефектного отверстия на горизонтальном участке трубы газопровода, скорость газа увеличивается, согласно закону Бернулли, при увеличении скорости потока газа происходит снижение давления. Под действием большего значения скорости газа в горизонтальном участке газопровода цилиндрическая втулка сдвигается до места участка разгерметизации, перекрывая сквозной дефект, восстанавливая работоспособность газопровода. Работа включает прочностной расчет цилиндрической втулки, моделирование тел (горизонтального участка и втулки), расчет на обоснование движения тела.

Д.А. Максимов, Е.В. Колесник
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ РЕАЛЬНОГО ГАЗА В КОДЕ SINF/FLAG-S ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ СУЩЕСТВЕННО СЖИМАЕМОГО ГАЗА

В широком диапазоне параметров реальные газы некорректно описываются уравнением состояния совершенного газа, в частности, при фазовых переходах или при приближении значений термодинамических параметров к критическим величинам. Кроме этого, предположение о постоянстве физических свойств также не всегда справедливо. Настоящая работа посвящена программной реализации термического и калорического уравнений состояния реального газа на базе конечно-объемного «неструктурированного» программного кода SINF/Flag-S, разрабатываемого в СПбПУ.

Код SINF/Flag-S был модифицирован для возможности легкого внедрения произвольного уравнения состояния, и программно реализована модель реального газа Анжье-Редлиха-Квонга. Кроме этого, был написан отдельный модуль для учета переменной теплоемкости совершенного газа, заданной в виде некоторой функции от температуры. Верификация реализованных моделей выполнена путем проведения тестовых расчетов невязкого течения в сопле Лаваля для различных условий (течение газа с большой молекулярной массой, течение водяного пара) и сопоставления с результатами, полученными по коду ANSYS Fluent.

Проведены расчеты для условий экспериментального исследования обтекания затупленного тела сверхзвуковым потоком, выполненного на Малой Ударной Трубе лаборатории газовой динамики ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Исследовалось обтекание модели при числе Маха 5, в качестве рабочего газа использовался азот. В расчетах показано влияние учета переменных свойств азота на параметры обтекания.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕННОЙ НАСАДКИ РЕКУПЕРАТОРА

Воздух является жизненно необходимым фактором для человека. Значительное время человек проводит в помещении и зачастую комнатный воздух содержит гораздо больше углекислого газа чем уличный. Качество воздуха в помещении определяется содержанием кислорода, концентрацией мелкодисперсных частиц загрязнений, антропоксинов. Данные показатели напрямую влияют на здоровье и самочувствие человека. Для проветривания помещений используют разные устройства, но наиболее перспективным является рекуператор. Преимущество рекуператора по сравнению со стандартным проветриванием заключается в элементе рекуператора – теплообменной насадке. Приточный воздух получает тепло, которое осталось в насадке после прохождения вытяжного воздуха. В цикле притока насадка передает теплоту поступающему в помещение воздуху.

Насадка изготавливается при помощи аддитивных технологий и представляет собой цилиндр, заполненный трижды периодической минимальной поверхностью. Для исследования эффективности теплообменной насадки определялись: коэффициент теплоутилизации, расход и скорость выходящего воздуха. При этом варьировались параметры: длины и размера структурного элемента насадки.

Экспериментальная установка состоит из рекуператора и измерительной системы. Рекуператор с вентилятором внутри находится в сквозном цилиндрическом отверстии в стене. В зависимости от эксперимента в рекуператор помещается определенная теплообменная насадка. Измерительная система установки представлена восьмиканальным измерителем ТРМ 148, преобразователем АС-4, хромель-копелевыми термодарами, анемометром и компьютером. Исследования проводились при различных уличных температурах. Были построены графики зависимости коэффициента теплоутилизации, скорости выходящего воздуха и его расхода в зависимости от варьируемых параметров теплообменной насадки и начальных условий эксперимента.

Н.А. Монахов¹, П.А. Попов¹, А.В. Павлов², В.А. Сахаров¹, Р.О. Куракин¹
¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА В КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКЕ ЗАТУПЛЕННОГО ТЕЛА С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА НА ГЕТЕРОГЕННОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ

Современная экспериментальная газодинамика предъявляет жесткие требования к достоверности получаемых результатов. Особенно это относится к измерениям теплового потока на высокоэнтуальпийных установках в силу косвенного характера измерений и широкого спектра физических воздействий на рабочую поверхность датчика при высоких температурах газа. Датчик на основе гетерогенной металлической структуры из пары медь-никель является удобным и надежным инструментом в арсенале аэродинамика-экспериментатора. Основной областью применения датчиков данного типа является измерение теплового потока в областях максимального силового и теплового воздействия, где иные средства измерения неприменимы.

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей измерений теплового потока в экспериментах на ударных трубах с помощью датчика на основе гетерогенной металлической структуры. Представлены результаты импульсной калибровки датчика нагретым газом за отраженной ударной волной, в ходе которой определен вольт-ваттный коэффициент и динамические характеристики. Показано, что результаты калибровки хорошо совпадают с данными численного расчета. Проведено измерение теплового потока в критической точке затупленного тела при различной энтальпии набегающего потока газа. Полученные результаты сопоставлены с известными теоретическими зависимостями для теплового потока.

Н.А. Монахов¹, А.В. Масюкевич¹, П.А. Попов¹, Е.В. Колесник², Е.В. Бабич²
¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ТЕПЛОвого ПОТОКА В ПЕРЕДНЕЙ ОТРЫВНОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА СПУТНЫМ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УДАРНОЙ ТРУБЕ

Исследование особенностей нестационарного взаимодействия ударных волн с пограничным слоем является одной из актуальных задач современной газодинамики. К настоящему моменту достаточно подробно изучены основные особенности вязко-невязкого взаимодействия в широком диапазоне чисел Маха и Рейнольдса набегающего сверхзвукового потока. Несмотря на многолетнюю историю экспериментальных исследований, основная диагностика потока, как правило, включала лишь измерение давления и теневую фотосъемку. При этом измерение такой важной для практических приложений величины, как тепловой поток, представлено в незначительном количестве работ. Основным направлением современных исследований является анализ нестационарных газодинамических процессов в области взаимодействия, где публикации с результатами тепловой диагностики полностью отсутствуют.

В настоящей работе представлены результаты измерения теплового потока и давления в передней отрывной зоне перед цилиндрическими препятствиями различного диаметра, обтекаемыми сверхзвуковым потоком. Для измерения теплового потока использовались разработанные в СПбПУ датчики на основе анизотропных термоэлементов из монокристалла висмута. Эксперименты проведены на ударной трубе прямоугольного сечения ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Задачей экспериментов было получение как средних значений величин, так и пульсационных составляющих.

Д.А. Муранов, А.Г. Абрамов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СОЗДАНИЯ СУРРОГАТНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О ДВУМЕРНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В КАНАЛЕ С КРУТЫМ РАЗВОРОТОМ

Обсуждается начальный опыт разработки и апробации базирующейся на алгоритмах машинного обучения методики создания суррогатных моделей, аппроксимирующих с

приемлемой точностью результаты численного моделирования гидродинамических задач и нацеленных на существенное повышение вычислительной эффективности.

Инженерно-физический прототип и источник массива данных для машинного обучения – турбулентное изотермическое течение несжимаемой жидкости в плоском канале с крутым поворотом потока на 180°. Набор данных был сформирован ранее в результате проведения методом RANS многопараметрических расчетов при варьировании значений числа Рейнольдса, угла направления потока по отношению к оси канала, соотношения ширины входа к ширине выхода (расширения) и радиуса поворота канала. Расчеты были выполнены с помощью CFD-кода SINP, разрабатываемого в Физико-механическом институте СПбПУ.

Суррогатная модель создавалась для предсказания гидравлического сопротивления (коэффициента потерь) в условиях меняющихся параметров, описывающих постановку задачи с акцентом на потенциальное снижение потерь. Методика разработки суррогатной модели включает два этапа. Первый этап предполагает проведение оценки максимально достижимого качества аппроксимации на наборах данных, неиспользованных в процессе обучения модели, с привлечением базовых метрик задачи регрессии (MAE, MAPE, R2, MSE). Второй этап состоит в изучении возможностей создания алгоритма машинного обучения, который позволил бы существенно уменьшить количество данных, требуемых для достижения приемлемого уровня точности. Реализация алгоритма основана на методе активного обучения с выбором на каждой итерации процесса совокупности параметров, с которыми необходимо провести расчет для получения максимального прироста качества модели при добавлении соответствующего объекта в обучающий набор данных.

М.А. Олисов¹, Д.С. Пашкевич^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²ООО «Новые химические продукты»

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РЕГЕНЕРАЦИИ ФТОРА И ЛИТИЯ ИЗ ГЕКСАФТОРФОСФАТА ЛИТИЯ ПРИ ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ВОДОРОДОМ И КИСЛОРОДОМ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

В связи с расширением производства литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) становится перспективным изучение методов регенерации фтора и лития из электролита отработанных ЛИА и возвращение этих веществ в производственный цикл. В данном исследовании рассмотрена возможность регенерации лития и фтора из гексафторфосфата лития $LiPF_6$, одного из наиболее распространённых компонентов электролита ЛИА, при взаимодействии $LiPF_6$ с H_2 и O_2 в режиме горения.

Из экспериментальных данных известно, что при высокотемпературном (порядка 2000 К) гидролизе некоторых фторидов в режиме горения при их взаимодействии с метаном или водородом и кислородом удаётся регенерировать фтор в виде HF и получить состав продуктов, близкий к термодинамически равновесному. В связи с этим были проведены расчёты термодинамических равновесных составов веществ для системы элементов $Li-P-F-H-O$ с помощью расчётного кода «АСТРА-4». Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для $LiPF_6$ термодинамически не запрещена полная регенерация фтора в виде HF для всего реального диапазона изменения температуры. Основным литийсодержащим веществом является $LiPO_3$, из которого фторированием элементарным фтором можно получить LiF и PF_5 для дальнейшего синтеза $LiPF_6$. Для реакции $3LiPF_6 + 11H_2 + 3,5O_2 \rightarrow Li_3PO_4 + P_2O_5 + 18HF + 2H_2O - 1735$ кДж/моль, адиабатическая температура продуктов без учёта их диссоциации составляет 2172 К.

Таким образом, регенерация фтора в виде HF и лития в виде его фосфатов из $LiPF_6$ при его взаимодействии с H₂ и O₂ в режиме горения термодинамически не запрещена.

Ф.А. Орлов¹, П.А. Попов¹, Н.А. Монахов¹, М.А. Котов²
¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ЗА ОТРАЖЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ДАТЧИКАМИ НА ОСНОВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИ АНИЗОТРОПНОЙ ПЛЕНКИ

Измерение тепловых потоков к поверхности модели, обтекаемой сверхзвуковым потоком газа, является одной из важнейших задач газодинамического эксперимента. Оно позволяет получить интегральную характеристику процессов теплообмена в ударном слое. В настоящее время, предъявляются жесткие требования к точности получаемых экспериментальных данных. Измерение теплового потока с малым значением неопределенности сопряжено со значительными трудностями, вызванными косвенным характером измерений на импульсных установках. Перспективным направлением исследований в области научного приборостроения является создание датчиков, позволяющих напрямую измерять проходящий через них тепловой поток.

В настоящей работе исследуются возможности нового типа датчика на основе термоэлектрически анизотропных пленок из теллурида германия и хрома. Их отличительной особенностью является существенно большая чувствительность по сравнению с аналогичными датчиками. Это значительно расширяет область применимости датчика и повышает качество проводимых измерений. С помощью калибровки по отраженной ударной волне получен вольт-ваттный коэффициент и определены динамические характеристики датчика. Эксперименты проводились на малой ударной трубе ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Выполнены измерения теплового потока за отраженной ударной волной при различных значениях энтальпии газа, в том числе, когда доля лучистого теплового потока становится значительной.

Д.С. Осадчий¹, Е.В. Колесник¹, П.А. Попов², В.А. Сахаров¹, Н.А. Монахов²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УДАРНОЙ ТРУБЕ С ОТРАЖАЮЩИМ СОПЛОМ НА ОСНОВЕ КВАЗИОДНОМЕРНОГО ПОДХОДА

В настоящее время, экспериментальное исследование обтекания моделей высокоэнтальпийным потоком газа, осуществляется на импульсных газодинамических установках различного принципа действия. Одной из наиболее часто используемых конфигураций является ударная труба с отражающим соплом, установленным в торце камеры низкого давления. Достоверное определение параметров нагретого газа за отраженной ударной волной на входе в сопло является важным и необходимым шагом при оценке параметров сверхзвукового потока в его выходном сечении. Детальное численное моделирование всей совокупности физических явлений в ударной трубе начиная с момента разрыва диафрагмы и заканчивая запуском сопла и формированием структуры обтекания исследуемой модели является чрезвычайно сложной задачей, требующей значительных

вычислительных мощностей. Возможным подходом к решению данной проблемы является моделирование всех значимых газодинамических процессов в квазиодномерной постановке с упрощенным учетом вязких эффектов на внутренней стенке ударной трубы. Это позволяет с достаточной для практического применения точностью рассчитать изменение скорости падающей ударной волны и контактной поверхности, а также учесть их влияние на параметры газа за отраженной ударной волной без использования значительных вычислительных ресурсов. Это является принципиально важным при определении времени существования области с неизменными параметрами на входе в сопло.

В работе представлен расчет ряда характерных режимов Большой ударной трубы ФТИ им. А.Ф. Иоффе с помощью квазиодномерного кода L1d, входящего в Gas Dynamics Toolkit, разработанный в Университете Квинсленда. Проведено сравнение расчетных данных с результатами экспериментов и показана принципиальная важность учета вязких эффектов для достоверного прогнозирования пространственного и временного распределения параметров газа в области перед входом в сопло.

Л.А. Осадчий¹, А.В. Гарбарук²

¹Лицей “Физико-техническая школа”, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТОРОИДАЛЬНЫХ ВИХРЕЙ В ВОЗДУХЕ

Работа посвящена исследованию распространения тороидальных вихрей в воздухе, в ходе которого проводились эксперименты и осуществлялось численное моделирование для анализа влияния параметров генератора на положение и скорость вихря. Обнаружено, что вихрь перестает быть видимым еще до полной остановки, что объясняется динамикой его движения и подтверждается численными расчетами. Результаты численного моделирования зависимости скорости от времени хорошо согласуются результатами эксперимента.

К.Ю. Пожванюк, С.В. Булович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ЩЕЛЕВОМ ЗАЗОРЕ РОТОРНО-ЛОПАСТНОЙ МАШИНЫ

Работа посвящена исследованию течения газа в зазоре между подвижными лопастями, совершающими круговое движение, и неподвижным цилиндрическим корпусом роторно-лопастной машины. Рассмотрена реальная геометрия роторно-лопастной машины с выбором определяющих параметров для типичных режимов течения. Двумерная математическая модель построена в пакете прикладных программ ANSYS Fluent. Для корректной постановки граничных условий геометрия щелевого зазора дополнена входным и выходным участками. В расчетах используется четырехугольная неструктурированная сетка со сгущением к твердым поверхностям.

В результате численного интегрирования системы уравнений Навье-Стокса по методу контрольного объема проведены оценки расходных характеристик щелевого зазора роторно-лопастной машины. Исследованы различные режимы течения газа, в том числе – критический. Запирание потока происходит в окрестности выходного края щели, при этом за срезом формируется пристенная недорасширенная струя газа. Установлено влияние на величину расхода стеснения потока на входном и выходном участках щели, вращения ротора

и лопасти, температурного фактора и изменения режима течения газа, в случае перехода к турбулентной форме движения.

Д.К. Попова^{1,2}, Н.Н. Кортиков¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²АО «ОДК-Климов»

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕПАРАЦИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОТЕРЯМИ В СТУПЕНИ ТУРБИНЫ

Целью данной работы является исследование влияния положения форсунок камеры сгорания (clocking effect) и температурно-скоростной неравномерности на выходе из КС на температурную сепарацию на поверхности рабочих лопатках газовой турбины, а также на эффективность работы турбины.

Расчет газодинамических процессов в турбинной ступени проводился в программном комплексе *STARCCM+* в трехмерной постановке. Решалась система уравнений Навье-Стокса и энергии, осредненных по Рейнольдсу, описывающая нестационарное течение совершенного сжимаемого газа по методу скользящих сеток.

Было получено, что при отсутствии закрутки потока регулировка расположения теплового пятна относительно входа в межлопаточный канал приводит к разнонаправленному поведению в изменении эффективности ступени и температурной сепарации. В частности, расположение теплового пятна по центру приводит к благоприятному понижению температурной сепарации и к неблагоприятному понижению КПД. При наложении закрутки потока в тепловом пятне при расположении по центру происходит возрастание КПД с одновременным ростом температурной сепарации.

Управляющее комбинированное воздействие в виде закрутки и окружного смещения форсунки не приводит к одновременному совершенствованию аэродинамических и тепловых характеристик проточной части ступени турбины. Это определяет необходимость выбора приоритета при согласовании рабочих процессов в камере сгорания и газовой турбины авиационного двигателя.

А.С. Романов^{1,2}, П.Н. Коок²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²АО «НЗЛ»

СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛО-ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

В рамках программы по модернизации ГПА-32 «Ладога» на базе MS5002E предусмотрено повышение температуры газа на входе в турбину, а также увеличение ресурса эксплуатации лопаточных аппаратов ГТУ. Возможность реализации данных задач напрямую зависит от эффективности охлаждения турбины, в частности лопаточного аппарата первого рабочего венца. В работе проведен теплосопряженный газодинамический расчёт рабочей лопатки первой ступени турбины высокого давления ГПА-32 «Ладога», посредством решения методом контрольных объёмов осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Выполнен анализ картины течения в системе охлаждения лопатки, определено тепловое состояние лопатки, а также дана оценка эффективности охлаждения. Расходные характеристики системы охлаждения сопоставлены с гидравлическими расчётами по

методике Харьковского турбинного завода [Конструкции и расчет систем охлаждения ГТД / Под ред. Слитенко А.Ф., 1994].

Е.В. Садикова¹, В.В. Капустин^{1,2}, Д.С. Пашкевич^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²ООО «Новые химические продукты»

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ ТРИФТОРИДА КОБАЛЬТА

Трифторид кобальта CoF_3 используют для неструктивного водородзаместительного фторирования летучих углеводородов, которое обычно проводят при температуре 300-400 °С. Некоторые исследователи рассматривают возможность использования CoF_3 в качестве рабочего тела для твёрдотельного генератора фтора.

В обоих указанных областях применения важную роль играет термостабильность CoF_3 , т.е. значение равновесного давления фтора над CoF_3 - CoF_2 в зависимости от температуры.

В связи с этим были проведены расчёты термодинамически равновесного состава веществ в системе элементов Co - 3F в зависимости от температуры с использованием программного комплекса Астра-4, основанного на поиске максимума энтропии смеси веществ. В результате было показано, что степень диссоциации CoF_3 при температуре ниже 1000 К пренебрежимо мала. Также пренебрежимо мала при $T < 1000$ К равновесная концентрация газообразного CoF_3 . При этом в термодинамически равновесной смеси концентрация газообразного CoF_3 существенно выше, чем концентрация молекулярного и атомарного фтора.

На основании полученных результатов можно предположить, что процесс фторирования углеводородов CoF_3 протекает на поверхности частиц CoF_3 , на которой фторируемое вещество адсорбируется, а не в газовой фазе.

Кроме того, можно предположить, что использование CoF_3 в качестве рабочего тела для твёрдотельного генератора фтора не целесообразно, т.к. концентрация CoF_3 в газовой фазе, покидающей генератор, будет выше, чем концентрация фтора, что может привести к выходу из строя оборудования, предназначенного для приёма фтора.

Д.С. Селезнёва, С.А. Князев, В.В. Сероштанов, А.А. Гусаков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПОПЕРЕЧНО ОБТЕКАЕМОГО ЦИЛИНДРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕРЖНЕЙ-ТУРБУЛИЗАТОРОВ

Потребность в высокоэффективных и компактных теплообменниках стимулирует развитие методов интенсификации теплообмена при сохранении оптимальных гидродинамических характеристик. Одним из способов интенсификации является управление отрывом потока от поверхности теплообмена с помощью искусственной шероховатости.

Представлено экспериментальное исследование конвективного теплообмена на поверхности одиночного кругового цилиндра, оснащенного круглыми стержнями-турбулизаторами относительной толщиной $d/D = 0,024$ и $0,048$ (d и D – диаметры турбулизаторов и несущего цилиндра, соответственно). Два стержня симметрично устанавливались вдоль образующих цилиндра на угол $\psi = 15 \dots 90^\circ$, отсчитываемый от

лобовой образующей. Несущий цилиндр – полый – обогревался насыщенным водяным паром при атмосферном давлении, обеспечивающий постоянную температуру поверхности цилиндра, близкую к 100° С. Исследования проводились в диапазоне чисел Рейнольдса Re от 3900 до $30 \cdot 10^4$.

В работе применены две методики: Particle Image Velocimetry (PIV), позволившая получить поля и распределения скоростей на поверхности цилиндра и в следе за ним, и градиентная теплометрия, применявшаяся для измерения местной плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи по поверхности цилиндра.

Показано влияние толщины и угла ψ на структуру течения на поверхности и в следе за цилиндром, и, как следствие, на изменение коэффициента сопротивления и среднее по поверхности число Нуссельта. Выявлены геометрические параметры системы и режимы, для которых наблюдается повышение интенсивности теплообмена при снижении аэродинамического сопротивления.

А.В. Семенюта, А.А. Матюшенко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАДНЕГО АНТИКРЫЛА ГОНОЧНОГО АВТОМОБИЛЯ

Заднее антикрыло гоночного автомобиля является важным его элементом, поэтому определение аэродинамических характеристик антикрыла, а также их оптимизация являются значимыми задачами при разработке гоночного автомобиля. При режимах обтекания, приближенных к реальным условиям, числа Рейнольдса составляют порядка 10^5 , поэтому на антикрыле происходит ламинарно-турбулентный переход (ЛТП), который влияет на аэродинамические свойства крыла. В рамках решения уравнений Рейнольдса для предсказания ЛТП используются так называемые модели перехода.

В данной работе были проведены расчеты различных режимов обтекания заднего антикрыла гоночного автомобиля «Тре» в предположении полностью турбулентного его обтекания (модель $k-\omega$ SST) и с учетом ЛТП (модель γ -alg-SST). Результаты расчетов показали, что при полностью турбулентном обтекании решение является стационарным, а при учете перехода - нестационарным. В этом решении формируются нестационарные локальные отрывные зоны в области ЛТП, которые оказывают глобальное влияние на всю структуру нестационарного течения.

Результаты расчетов продемонстрировали существенное влияние ЛТП на предсказанные аэродинамические свойства антикрыла.

Ю.А. Устин, П.В. Яковлев

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБАХ ЖАРОТРУБНЫХ КОТЛОВ

Паспортный к.п.д. жаротрубных котлов, в большом количестве применяемых в котельных коммунального назначения, чаще всего находится в пределах 80%. Это обусловлено требованием снижения стоимости, достигаемым ограничением площади

теплообменной поверхности, и, как следствие, к повышению температуры уходящих газов. Для повышения к.п.д. применяются различного рода вставки-турбулизаторы в жаровые трубы. Исследование эффективности вставок и поиск путей их совершенствования стали целью работы.

Метод исследования – численное моделированное.

Основные результаты работы: Применение вставок-турбулизаторов интенсифицирует теплообмен, увеличивая сопротивление газового тракта. Исследование показало, что значительный вклад в интенсификацию теплообмена вносит лучистый теплообмен, поэтому сопоставимый эффект может быть получен применением гладких листов-экранов, омываемых высокотемпературным потоком газа. Экраны интенсифицируют лучистый теплообмен, снижая температуру уходящих газов. Гладкие листы, в отличие от профилированных, имеют меньшую стоимость, менее подвержены загрязнению, незначительно повышая аэродинамическое сопротивление.

Т.А. Федорова¹, Д.С. Пашкевич^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²ООО «Новые химические продукты»

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА С ВОДОРОДОМ И КИСЛОРОДОМ И С МЕТАНОМ И КИСЛОРОДОМ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

При изотопном обогащении природного урана в качестве побочного продукта образуется гексафторид урана, обеднённого по U-235 (ОГФУ). Одним из направлений исследований по разработке технологии регенерации фтора из UF₆ является изучение процесса взаимодействия ОГФУ с водородсодержащими веществами и кислородом в режиме горения. Для численного исследования процессов, в которых в качестве водородсодержащих топлив выступают метан и водород, была построена и верифицирована математическая модель турбулентного диффузионного горения, реализованная в программном комплексе «Ansys Fluent».

В настоящей работе проводится сравнение основных характеристик процесса, полученных численным экспериментом – максимальная температура в зоне реакции, характерный размер рециркуляционных течений, глубина конверсии ОГФУ, удельная производительность реактора и др. – которые реализуются в реакторе типа «туннельная горелка» при использовании в качестве водородсодержащего вещества метана и водорода.

А.В. Филатова, М.А. Засимова, А.Г. Абрамов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ОДНОРЯДНЫЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ ТРУБНЫЙ ПУЧОК С ВНЕШНИМ ОРЕБРЕНИЕМ

Представляются результаты численного моделирования свободноконвективного течения воздуха в однорядном пучке, состоящем из шести оребренных труб. Подобные конструкции широко применяются в промышленности для охлаждения технологических сред в составе аппаратов и теплообменников воздушного охлаждения. Геометрические параметры

задачи: диаметр несущей трубы 26.4 мм, диаметр сплошного поперечного ребра 56.8 мм (его высота 15.2 мм), толщина ребра 0.55 мм, расстояние между ребрами по длине несущей трубы 2.43 мм. Коэффициент оребрения равен 20.9. Вдоль оси трубы расчетная область охватывала половину шага оребрения. Поперечный шаг труб варьировался от 58 до 150 мм. Рассмотрены варианты без введения и с введением с боковых сторон пучка ограничивающих вертикальных пластин с высотой, близкой к диаметру ребра. Значения числа Грасгофа находились в диапазоне $10^4 \dots 10^6$. Многопараметрические трехмерные нестационарные расчеты проведены в пакете ANSYS Fluent на основе системы уравнений Навье-Стокса, дополненной уравнением энергии. Использовалась модель сжимаемого совершенного газа с термодинамическими и теплофизическими свойствами, зависящими от температуры. Размерности расчетных сеток составляли до 300 тысяч ячеек.

Установлено, что под действием сил плавучести воздух движется по направлению к трубному пучку и проходит сквозь межреберное пространство с формированием над пучком теплового факела. Увеличение числа Грасгофа в рассмотренном диапазоне приводит к росту характерных значений скорости в межреберном пространстве пучка от 1 до 10 см/с. С увеличением межтрубного расстояния характерные значения скорости изменяются слабо. Интегральные значения числа Нуссельта, полученные в расчетах, хорошо согласуются с экспериментальными данными для всего набора значений числа Грасгофа. Оценивалось влияние краевых эффектов на теплоотдачу от поверхности пучка: показано, что различие между теплоотдачей от первой с края трубы для вариантов без введения и с введением с боков пучка ограничивающих пластин может достигать 25%.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 24-49-10003

Ю.С. Чумаков, Т.М. Хакимов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

УСТАНОВКА И МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКОВ ТА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ В НИЗКОСКОРОСТНОМ ВОЗДУШНОМ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ПОТОКЕ

Важным аспектом экспериментального изучения потоков жидкости или газа является выбор подходящей методики измерения скорости потока. К наиболее распространённым методам можно отнести метод ЛДИС (лазерное доплеровское измерение скорости), метод PIV (particle image velocimetry) и термоанемометрический метод (ТА). Особый интерес представляет именно последний, ввиду простоты своей реализации, сравнительной дешевизны и что самое важное, возможности непрерывного во времени измерения скорости. Однако существенным недостатком ТА метода является необходимость предварительной калибровки датчиков для определения соотношения между измеряемой скоростью и величиной выходного напряжения прибора. Для диапазона скоростей от нескольких метров до сотни метров существует отработанная методика калибровки, например, в аэродинамической трубе, с помощью трубки Пито-Прандтля. Однако подобная методика не годится в случае низких скоростей, лежащих в области гипозвука, ввиду невозможности получения стабильного потока. Это ограничивает применение термоанемометрии при исследовании низкоскоростных потоков, имеющих место, в частности, при изучении свободноконвективных неизотермических течений. Для устранения этого ограничения была разработана специальная методика калибровки, приводимая в данной статье. Методика и сконструированная на её основе установка, позволяют проводить калибровку датчиков при различных температурах в диапазоне скоростей от нескольких сантиметров до 0.5 метра в

секунду. В работе представлены примеры калибровочных зависимостей, полученных в процессе использования калибровочной установки.

Р.Р. Хозин¹, Ю.Е. Горбачев², Д.В. Лещев²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
²ООО «Софт-Импакт»

ВЛИЯНИЕ РАСХОДА ГАЗОВОЙ СМЕСИ CH_4/H_2 НА СКОРОСТЬ РОСТА АЛМАЗА МЕТОДОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Плазмохимическое осаждение из газовой фазы в смеси CH_4/H_2 является одним из перспективных методов получения алмазных материалов для широкого спектра приложений. В типовых реакторах для плазмохимического осаждения локализация электрического поля вблизи подложки позволяет сформировать плотную СВЧ плазму, приводящую к нагреву газа в камере реактора до 2500 С и образованию химически активных радикалов CH_3 и H , ответственных за рост алмазных покрытий. Одной из проблем данной технологии является доставка радикалов к поверхности подложки, которая может осуществляться за счет диффузии и конвекции. Концентрация и, следовательно, диффузионный поток частиц на подложку определяется пространственным распределением температуры газовой смеси, которая в свою очередь зависит от условий процесса, таких как давление газа и мощность источника плазмы. Конвективный перенос определяется течением газа в камере реактора и зависит от расположения газовых инжекторов, состава газовой смеси, расхода и давления.

В данной работе представлены результаты численного моделирования протекания газовой смеси 5% CH_4 в H_2 в области сильного нагрева газа с учетом объемных химических реакций, ответственных за генерацию радикалов CH_3 и H . Расход газа варьировался в широком диапазоне 10 – 500 сссм. Рассмотрена роль различных механизмов переноса в эффективности доставки радикалов на подложку и определено влияние на результирующую скорость роста материала.

Е.А. Хоменок, Ю.С. Чумаков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КУБА, УСТАНОВЛЕННОГО НА ПЛОСКОЙ СТЕНКЕ: ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ГРАНЕЙ К ПОТОКУ И СКРУГЛЕНИЯ РЕБЕР

Корректный учет ветрового воздействия на здания является важным этапом при их проектировании. Наиболее достоверный способ определения ветровых нагрузок – экспериментальные исследования крупномасштабных моделей объектов, которые включают в себя определение ветрового воздействия и структуры течения, формирующегося при взаимодействии воздуха с объектом. С точки зрения аэродинамики обтекание большинства существующих зданий аналогично обтеканию параллелепипедов с острыми кромками, которые фиксируют положение отрывных зон, влияющих на распределение давления и другие значимые величины. Целью данной работы являлись экспериментальные исследования по определению аэродинамических характеристик плохообтекаемого тела и возникающей структуры потока для модели упрощенной геометрии с несколькими типами кромок.

В данной работе в качестве упрощенной модели плохообтекаемого сооружения использовался куб, установленный на горизонтальной непроницаемой поверхности. Экспериментальное определение интегральных и распределенных нагрузок было проведено в Большой аэродинамической трубе Крыловского центра. В ходе работы было выполнено исследование аэродинамических характеристик тела в зависимости от числа Рейнольдса и угла направления потока. Полученные данные были сравнены с результатами численного моделирования, также проведенного в рамках данной работы.

В ходе работы были проведены эксперименты по обтеканию кубов с закругленными ребрами. Рассмотрены несколько вариантов радиуса закругления, для каждой модели получены распределения давления по поверхности, значения сил и моментов, действующих на модели, а также проведена визуализация возникающего течения.

С.Т. Шекелашвили, Н.А. Щур
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАСЧЕТ ПРОПУЛЬСИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФИЛЯ, СОВЕРШАЮЩЕГО ВЗМАХОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ

В работе с целью моделирования работы взмахового движителя рассматриваются гармонические трансляционные и вращательные колебания двумерного профиля NACA 0012 в свободном потоке. Такой механизм пропульсии вдохновлен механикой плавания рыб и морских млекопитающих: они эффективно перемещаются в своей среде обитания, развивая высокие скорости и поддерживая существенное КПД. Расчёты осуществляется с применением URANS подхода, движение профиля моделируется с использованием метода деформируемых сеток с алгебраическим алгоритмом деформации. Параметры колебаний выбираются исходя из представленных в литературе результатов экспериментальных исследований. Число Рейнольдса, рассчитанное по хорде профиля, составляет $4 \cdot 10^4$. Работа направлена на исследование зависимости силовых характеристик профиля от числа Струхала при фиксированном максимальном угле атаки за период колебаний. Наблюдается неплохое соответствие с экспериментальными данными как по средней тяге, так и по энергетическим затратам.

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ УСТАНОВКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОРОНАРНЫХ СТЕНТОВ

В настоящее время коронарное стентирование с применением полимерных стентов является одной из самых перспективных процедур в области лечения ишемических болезней сердца. Поэтому крайне важно понимать ключевые этапы проведения данного высокотехнологичного медицинского вмешательства. В данном исследовании основное внимание уделено анализу основных этапов стентирования при помощи методов математического моделирования. В качестве объектов исследования были выбраны коронарные стенты из полимолочной кислоты (PLLA) двух различных топологий: с синусоидальным элементом и с элементом Z-формы. Численное моделирование проводилось с использованием системы конечно-элементного анализа ANSYS. Были проанализированы деформации, возникающие при предварительном сжатии коронарного стента и форма раскрытия баллона. Получено напряженно-деформированное состояние стенок сосуда и атеросклеротической бляшки при раскрытии коронарного стента.

Охотников А.О.¹, Рахман М.¹, Антонова О.В.¹, Охотников О.И.²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Курский государственный медицинский университет

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПОТОКА СОДЕРЖИМОГО ДВЕНАДЦАТИПЕРСТНОЙ КИШКИ ПРИ ПЕРИСТАЛЬТИЧЕСКОМ ДВИЖЕНИИ ЕЕ СТЕНКИ

Работа направлена на исследование и математическое моделирование биомеханики двенадцатиперстной кишки и динамики потока содержимого в условиях перистальтики. Стандартный покрытый эндобилиарный стент не обладает конструктивными антирефлюксными механизмами и уменьшить выраженность дуодено-билиарного рефлюкса, как показывает клинический опыт, можно лишь особенностями установки стента в рабочую позицию, а именно, чем глубже в просвет 12-перстной кишки от зоны БСДК (большой сосочек двенадцатиперстной кишки) будет проведен стент (чем длиннее будет внутрикишечный сегмент), тем меньше выраженность рефлюкса. Перистальтическое движение стенки кишки моделировалось, как сочетание радиального сжатия в последовательных сегментах двенадцатиперстной кишки и волнообразного движения стенки кишки. Целью исследования было изучение гидродинамических характеристик потока для дальнейшего использования при моделировании поведения эндобилиарного стента. Численное моделирование проводилось с использованием программных комплексов ANSYS и ANSYS CFX.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ СТЕНТА В МНОГОСЛОЙНОЙ АРТЕРИИ С
УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖИДКОСТИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА:
АНАЛИЗ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Атеросклеротическое поражение коронарных артерий является патологическим процессом, который характеризуется накоплением липидов, преимущественно холестерина на внутренней поверхности сосудов. Чтобы восстановить кровоток и улучшить состояние пациента, применяется имплантация коронарных стентов. Однако, может возникнуть повторный стеноз - рестеноз. Численное исследование с помощью двустороннего взаимодействия "жидкость - твердое тело" позволяет прогнозировать рестеноз. Анализ рестеноза проводился для трех моделей стентов из материала CoCr. Моделирование системы "артерия – бляшка" учитывало анизотропные гиперупругие механические параметры. Сравнивались граничные условия " Fixed support " и " Remote Displacement ". Результаты показали, что разница между гемодинамическими параметрами при использовании этих граничных условий не превышала 2%. Также было выявлено, что граничное условие " Remote Displacement " сокращает время расчета в 1,7-2,0 раза по сравнению с "Fixed support ". Модель " SIMPLE " стента была наиболее подвержена развитию рестеноза со значениями пристеночных касательных напряжений равными 189 по сравнению с моделями Vx_Velocity - 82 Па и SAVIOR - 51,3 Па.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 23-79-01284, <https://rscf.ru/project/23-79-01284/>».

К.К. Забелло, Н.А. Щур
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА
С ВОЛНООБРАЗНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ПЛАВНИКОВ ТИПА КАРАКАТИЦА

Подводные роботы стали незаменимым инструментом для океанографов, морских биологов и даже военных. Эти роботы предназначены для исследования глубин океана, сбора данных и выполнения различных задач.

В работе рассматривается задача моделирования управляемого движения создаваемого крупномасштабной деформацией плоского бокового плавника, закрепленного на аппарате эллиптического сечения. Управление осуществлялось по курсу с использованием ПД регулятора. Линия крепления самого плавника неподвижна, а максимальная амплитуда деформации соответствует свободному краю плавника. Сама деформация задаётся в виде бегущей волны. Учет движения границ расчетной области осуществлялся с применением деформируемых расчетных сеток с авторским алгоритмом деформации.

По результатам исследований установлено, что предложенная движительная схема аппарата является плохо управляемой по курсу на маршевой скорости. Причина заключается в наличии препятствующем управлению гидродинамическом моменте, вызванным наличием поперечной составляющей тяги плавников.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТРЕХМЕРНОГО ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛЯХ ВРЕМЕННЫХ ПРОТЕЗОВ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ

В данной работе представлены результаты исследования особенностей изменения гидродинамических показателей тока крови в просвете временных сосудистых протезов. Целью исследования было определение наиболее функционально выгодных типов сосудистых протезов, используемых для временного восстановления кровотока при повреждении магистральных артерий конечностей. В ходе исследования были проведены численные исследования на моделях временных сосудистых протезов двух типов: прямых и петлеобразных.

В частности, были учтены особенности входной кромки протеза, которая может значительно повлиять на развивающееся течение и, следовательно, на места возможного тромбообразования. Были проанализированы распределения осевой скорости, сдвиговые напряжения на стенке и особенности формирующихся вторичных токов в зависимости от конфигурации протеза. Полученные результаты позволили определить наиболее функционально выгодные типы временных сосудистых протезов, которые обеспечивают оптимальные условия для восстановления кровотока и минимизируют риск развития осложнений.

РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В МОДЕЛИ СОСУДА СО СТЕНОЗОМ

Артериальные стенозы возникают из-за образования локального сужения кровеносного сосуда вследствие различных отложений на его стенках и разрастания соединительных биологических тканей, что приводит к образованию бляшек, которые разрастаются внутрь сосуда и ограничивают движение крови. Численное моделирование течения за стенозом сопряжено с трудностями, поскольку данное течение носит переходный характер от ламинарного к турбулентному и требует сложных и дорогостоящих методов расчета (DNS, LES). Однако подход на основе RANS моделей турбулентности может быть вполне эффективным, позволяя достичь компромисса по точности и вычислительным затратам.

Представлены результаты численного исследования особенностей течения в модели сосуда с сильным стенозом (площадь сужения составляет 75% от площади сосуда). Моделирование течения осуществлялось с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Анализ расчетных данных (профили скорости, длина зоны рециркуляции) позволяет заключить, что модель стационарного ламинарного течения пригодна для численного расчета течения за стенозом при числах Рейнольдса $Re < 300$. Для более высоких его значений предпочтительным оказывается применение RANS моделей турбулентности $k-\omega$, SST и BSL Reynolds Stress, которые дают близкие к эксперименту результаты.

¹Л.Г. Тихомолова, ¹А.Д. Юхнев, ²А.А. Вrabий

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

²Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад.
И.П. Павлова

ИССЛЕДОВАНИЕ КРОВОТОКА В МЕСТЕ ОТВЕТВЛЕНИЯ ШУНТА ОТ БЕДРЕННОЙ АРТЕРИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ МЕТОДАМИ

Целью работы является получение экспериментальных данных *in vivo* и *in vitro* о структуре течения в месте ответвления протеза от бедренной артерии двумя ультразвуковыми методами: цветовым доплеровским картированием и высокоскоростной ультразвуковой векторной визуализацией.

В ходе эксперимента *in vivo* проведено ультразвуковое обследование пациента двумя ультразвуковыми методами: цветовым доплеровским картированием и высокоскоростной ультразвуковой векторной визуализации. Максимальное входное число Рейнольдса – 1700.

Для измерений *in vitro* напечатана на 3D принтере модель, входной диаметр общей бедренной артерии 6 мм, а выходные диаметры протеза – 8 мм и глубокой бедренной артерии – 4 мм, с углами ответвления 50° и 40°, соответственно. Максимальное входное число Рейнольдса - 1000. Расход по протезу составлял 50% от входного.

Изучена структура кровотока в месте ответвления протеза от бедренной артерии. Получено качественное соответствие расположения зон рециркуляционного течения, определенных двумя методами *in vivo* и *in vitro*, а также количественное соответствие профилей скорости в двух сечениях модели: на начальном участке и на входе в протез в момент максимального расхода.

СЕКЦИЯ «МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА И КОНВЕРСИИ ЭНЕРГИИ»

Л.М. Капшуков, Н.Э. Шелехов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ДВИЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ПРИ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЯХ В СТЕРЖНЕ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ

Энергетическая динамика – раздел классической динамики, описывающий волновой перенос энергии по аналогии с законами механического движения материальных тел.

В докладе рассматривается применение теории энергетической динамики к распространению свободных поперечных колебаний в бесконечном стержне. Определяется координата энергетического центра и его скорость. Затем данная теория применяется для стержня конечной длины. Обсуждается справедливость такого перехода.

Полученный результат для стержня конечной длины сравнивается с аналитическим решением дифференциального уравнения свободных поперечных колебаний. Строятся зависимости координаты энергетического центра, энергии и потока от времени.

В будущем мы собираемся применить аналогичный подход к описанию поперечных колебаний во вращающемся кольце.

И.Е. Груздев, А.М. Кривцов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОСТРОЕНИЕ АНАЛОГИИ МЕЖДУ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ ВОЛН В УПРУГОЙ ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ И ГИДРОДИНАМИКОЙ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ.

В данной работе рассматривается движение финитного возмущения в абсолютно упругой изотропной среде, выводится локальный баланс плотности энергии и локальный баланс плотности потока энергии в отсутствие внешних подводов. С другой стороны, рассматривается идеальная жидкость, которая описывается локальными балансами массы и количества движения в отсутствие объемных сил. Для данных уравнений получены аналогии между плотностью и плотностью энергии, а также количеством движения и плотностью потока энергии.

Для замыкания каждой из систем уравнений необходимы определяющие соотношения. Например, для идеальной несжимаемой жидкости предполагается, что тензор напряжений шаровой. Для описания распространения энергии в среде выведено определяющее соотношение через плотность лагранжиана, как функцию от плотности энергии и плотности потока энергии. Таким образом, для энергии, плотности потока энергии и плотности лагранжиана в упругой среде построена замкнутая система уравнений.

А.Д. Ершов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

О ЗАДАЧЕ N-СТУПЕНЧАТОГО ПЕРЕХОДА МЕЖДУ ДВУМЯ ПОЛУБЕСКОНЕЧНЫМИ ОДНОМЕРНЫМИ КРИСТАЛЛАМИ

В данной работе рассматривается эволюция волнового пакета при прохождении интерфейса, соединяющего два полубесконечных гармонических кристалла на подложке. Исходя из ранее полученных формул для коэффициента прохождения волнового пакета через простейший интерфейс, аналитически получено выражение коэффициентов прохождения и отражения для N-ступенчатого случая, при достаточно большой длине переходных ступеней. Результаты были подтверждены численными расчетами. Из анализа формулы сделан вывод о равносильности всех переходных коэффициентов.

Проведено сравнение двухступенчатого интерфейса с простейшим случаем. Построены графики зависимости пропускающей способности двухступенчатого интерфейса по сравнению с простейшим интерфейсом при варьировании свойств интерфейсной ступени. Выделены области увеличения и уменьшения коэффициента прохождения.

Численно рассмотрены случаи прохождения волновым пакетом интерфейса в обратную сторону.

А.А. Кривцова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ДВИЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ВОЗМУЩЕНИЯ В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

В докладе обсуждается альтернативный подход к описанию локализованных волновых процессов, который сводит задачу о волновом переносе энергии к более простой задаче построения траектории для математической точки. Этот метод основан на теории энергетической динамики, а именно, на предположении о возможности замены волнового пакета его энергетическим центром.

В рамках доклада рассматривается полученное аналитическое решение для плоской среды с линейно меняющейся жесткостью, определяется форма траектории движения центра возмущения, а также зависимость угла распространения от отдаления от начального уровня среды. Приведенные результаты сравниваются с численным решением.

В дополнение предлагаются пути для дальнейшего развития теории. Обсуждаются способы и допустимость применения полученной модели в таких прикладных задачах, как движение волн на мелкой воде, оптика и сейсморазведка.

С.Д. Ляжков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт проблем машиноведения РАН

АНТИЛОКАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ВОЛН В ПОЛУБЕСКОНЕЧНОЙ ЦЕПОЧКЕ ГУКА СО СВОБОДНЫМ КОНЦОМ

Предложено аналитическое описание баллистического распространения тепловой энергии в полубесконечной цепочке Гука со свободным концом при мгновенном её подводе (т.е. тепловом ударе). С помощью асимптотической оценки решений Шрёдингера на

фронтах бегущей и отражённой от границы волн произведена континуализация дискретного решения для кинетической температуры. Показано, что полученное таким образом континуальное решение на границе затухает обратно пропорционально кубу времени, в отличие от классического континуального решения (удовлетворяющего принципу симметрии), затухающего на границе обратно пропорционально времени. Вышеупомянутый эффект связан с явлением «избегания» волнового поля окрестности границы при его распространении, которому С.Н. Гавриловым и Е.В. Шишкиной было дано название «антилокализация». С помощью континуального решения для кинетической температуры показано, что мгновенное тепловое возмущение какого бы то ни было профиля приводит к антилокализации.

А.А. Муравцев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ ДВУХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СКАЛЯРНЫХ РЕШЁТОК

В данной работе рассматривается распространение волн в системе, состоящей из двух соединённых друг с другом гармонических скалярных полубесконечных решёток. Заданы массы частиц, жёсткости пружин каждой из решёток и жёсткость интерфейса, соединяющего решётки.

Методом динамики частиц проводится моделирование прохождения волнового пакета через интерфейс при разных углах падения на границу двух решёток. На основе результатов моделирования строится график зависимости коэффициента прохождения (отношения энергии прошедшего волнового пакета к энергии падающего пакета) от угла падения на интерфейс.

Далее с помощью метода энергетической динамики ищется аналитическое выражение для коэффициента прохождения. И результаты численного моделирования распространения волнового пакета через границу рассматриваемых решёток сравниваются с аналитическим выражением.

В.А. Кузькин, И.Н. Трунова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ ТЕРМОУПРУГОСТЬ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПОЧЕК

Работа посвящена термоупругости нелинейной цепочки при задании начального теплового возмущения. Эволюция температуры описывается уравнением баллистической теплопроводности. Получено фундаментальное и общее решение, проведено сравнение с аналогичными решениями при теплопроводности Фурье. Рассмотрены два типа начальных распределений температуры: ступенчатое и гладкое (в виде синуса с огибающей).

Решение задачи для ступенчатого начального распределения приводит к неожиданному результату: на фронте волны возникают бесконечные деформации. Для объяснения этого эффекта решается две дополнительных задачи. Первая из них заключается в том, чтобы учесть дискретность среды хотя бы при описании температуры, и вместо уравнения баллистической теплопроводности использовать точное дискретное решение для температуры, полученное при точном решении уравнения динамики цепочки. Такой путь действительно приводит к ограниченным деформациям, но не дает хорошего совпадения с результатами численного эксперимента. Другая задача предполагает рассмотрение не

ступенчатого, а более физического кусочно-линейного начального поля температур, которое при увеличении наклона линейного участка стремится к ступеньке. При любом конечном наклоне такой подход дает конечные деформации. Показано, что с уменьшением начального градиента температур увеличивается точность совпадения с аналитическим решением.

Для начальной температуры в виде синуса с огибающей получено приближенное решение, показывающее, что возникающее поле перемещений представляет собой две волны с растущей амплитудой, которые бегут в разные стороны, а по форме повторяют начальное температурное поле.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И МЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ»	2
СЕКЦИЯ «ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НАНОСТРУКТУР»	13
СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И КОСМОСА»	20
СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ»	29
СЕКЦИЯ «ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА»	35
СЕКЦИЯ «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ МАТЕМАТИКИ И ФИЗИКИ»	41
СЕКЦИЯ «МЕХАНИКА И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ»	53
СЕКЦИЯ «ГИДРОАЭРОДИНАМИКА, ГОРЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН»	65
СЕКЦИЯ «БИОМЕХАНИКА»	88
СЕКЦИЯ «МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА И КОНВЕРСИИ ЭНЕРГИИ»	92